

UNIVERSIDADE DE LISBOA  
FACULDADE DE CIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



# Estudo de um processo de deposição de emissores selectivos para auto-construção de colectores solares térmicos

Rui Miguel Lucas Veloso Morais Parente

**Mestrado em Engenharia da Energia e do Ambiente**

**2011**



UNIVERSIDADE DE LISBOA  
FACULDADE DE CIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



# Estudo de um processo de deposição de emissores selectivos para auto-construção de colectores solares térmicos

Rui Miguel Lucas Veloso Morais Parente

**Dissertação de Mestrado em Engenharia da Energia e do Ambiente**

Trabalho realizado sob a supervisão de  
Professor Doutor Jorge Maia Alves (FCUL)

**2011**



## **Agradecimentos**

Em primeiro lugar quero agradecer ao meu orientador, Professor Jorge Maia Alves, pela disponibilidade em orientar uma tese de mestrado adicionando mais uma tarefa à já extensa lista de competências que ser professor universitário e coordenador de um curso implicam.

Agradeço também ao Professor João Serra por me ter ajudado em determinados momentos da tese em que foram necessárias executar algumas tarefas dentro das suas competências.

Agradeço aos meus pais porque mesmo não ajudando directamente na execução do trabalho estão sempre disponíveis para o que for preciso tanto a nível académico como no resto. Ao meu irmão e cunhada pelos mesmos motivos. Às minhas sobrinhas Mariana e Catarina por funcionarem como um escape a qualquer momento de stress que possa ter existido. À minha restante família, Tia, Madrinha e Prima por saber que se fosse preciso ajudavam como pudessem.

À minha namorada por me ajudar bastante e disponibilizar-se para tudo o que seja necessário, por me divertir e fazer sentir bem.

Aos meus amigos André Albuquerque, Miguel Maria, João Miranda, Ricardo Cunha, Francisco Carlos, Rafael Ventura, Pedro Dias, Filipe Macedo, Catarina Lima, Duarte Brandão, João Barrigó e mais alguns por serem boa gente.

Ao meu companheiro nesta luta que é fazer uma tese, José Madeira, por mandar umas bocas de vez em quando e pensar alto para eu saber o que ele está a fazer mesmo que não me interesse.



## **Abstract**

The widespread use of solar thermal collectors for water heating can be a major contribution to reducing the consumption of fossil fuels, particularly in regions where the solar resource is abundant, as in Portugal. Since a significant obstacle to the expansion of the use of solar collectors for water heating is the panel's price, self-construction of solar panels can be an important tool in increasing the market dynamics, as happened in the past, for instance, in Austria, a country where the solar resource is much lower than ours. In this thesis a process for production of selective surfaces on copper plates was studied. With this, we intend to give a contribution to the development of self-construction of solar panels, precisely in the most problematic step in this process: the self-construction of an efficient solar absorber.

## **Resumo**

A generalização do uso de colectores solares térmicos para aquecimento de águas sanitárias pode dar uma contribuição importante para a diminuição do consumo de combustíveis fósseis, em particular, em regiões onde o recurso solar é abundante, como acontece em Portugal. Uma vez que um dos obstáculos relevantes à expansão do uso de colectores solares para aquecimento de águas sanitárias é o preço dos painéis, o recurso à auto-construção de painéis solares térmicos pode ser uma ferramenta importante na dinamização do mercado, como se verificou, em particular, na Áustria, país onde o recurso solar é muito inferior ao nosso. No âmbito da presente dissertação estudou-se um processo para produção de superfícies selectivas sobre chapas de cobre, pretendendo-se assim dar uma contribuição para o desenvolvimento da auto-construção de painéis solares térmicos, precisamente naquele que é o passo mais problemático desse processo: a auto-construção de um absorvor solar eficiente.

**Palavras-chave:** Energia Solar Térmica; Colector Solar Térmico; Auto-construção; Absorvor selectivo



# Índice

Agradecimentos.....	iii
Abstract .....	v
Resumo.....	vi
1. Estrutura da Tese.....	1
2. Introdução.....	3
2.1 Recurso Solar .....	5
2.1.1 Recurso Solar em Portugal .....	5
2.2 Mercado Solar Térmico nos contextos Mundial, Europeu e Nacional.....	7
Mercado Europeu .....	9
2.3 Auto-construção de colectores solar térmicos.....	12
2.4 Colectores Solares Térmicos .....	18
2.4.1 Colector Solar Plano.....	19
3. Superfícies Selectivas.....	23
3.1 Fabrico de Superfícies Selectivas.....	28
3.1.1 Electrodeposição .....	28
3.1.2 Obtenção das Superfícies Selectivas .....	31
3.2 Caracterização das Superfícies Selectivas.....	36
4. Conclusões e Trabalho Futuro.....	58
5. Bibliografia.....	62



## Índice de Tabelas

Tabela 3-1 – Resultados obtidos para os parâmetros de ajuste linear representados na figura 3-14.....	43
Tabela 3-2 – Valores calculados de emissividade das superfícies considerando a percentagem de cobertura com tinta negra, e valores de tensão registada pelo sistema de medida interpolados para uma temperatura padrão de 80°C. ....	43
Tabela 3-3 – Valores de emissividade para deposições com $i=2 \text{ mA/cm}^2$ .....	45
Tabela 3-4 - Valores de emissividade para deposições com $i=4 \text{ mA/cm}^2$ .....	46
Tabela 3-5 – Valores de emissividade para deposições com $i=4 \text{ mA/cm}^2$ e metade dos tempos de deposição .....	46
Tabela 3-6 – Tabela de absortividade espectral, emissividade térmica e selectividade das superfícies depositadas com $i=2 \text{ mA/cm}^2$ .....	53
Tabela 3-7 - Tabela de absortividade espectral, emissividade térmica e selectividade das superfícies depositadas com $i=4 \text{ mA/cm}^2$ .....	54
Tabela 3-8 - Tabela de absortividade espectral, emissividade térmica e selectividade das superfícies depositadas com $i=144 \text{ mA}$ e metade dos tempos de deposição .....	55
Tabela 4-1 – Tabela de valores de absortividade e emissividade para a tinta selectiva da empresa SOLEC (SOLEC, 2011) .....	60



## Índice de Figuras

Fig. 2-1 – Mapa da irradiação solar anual na Europa expressa em (kWh/m <sup>2</sup> )/ano(Sapa Solar, 2011)....	5
Fig. 2-2 – Mapa da distribuição de radiação solar horizontal diária em Portugal em (MJ/m <sup>2</sup> )/dia(Portal das Energias Renováveis, 2011).....	6
Fig. 2-3 – Capacidade total mundial instalada e energia produzida considerando várias fontes renováveis de energia (Weiss & Mauthner, 2011). ....	8
Fig. 2-4 – Distribuição da capacidade total instalada de colectores solar térmicos em operação por regiões económicas até final de 2009. (Weiss & Mauthner, 2011).....	9
Fig. 2-5 – Área instalada de colectores solares térmicos na EU desde 1994, (2010 é uma estimativa, relativamente aos países pertencentes à União Europeia até à data)(EurObserv'ER, 2011). ....	10
Fig. 2-6 – Evolução do mercado solar térmico em Portugal entre 2004 e 2010. (Weiss & Mauthner, 2011).....	12
Fig. 2-7 – Imagem em corte de um colector solar plano (Carvalho, 2009).....	19
Fig. 2-8 – Balanço energético de um colector solar térmico. (Carvalho, 2009).....	21
Fig. 2-9 – figura esquemática do funcionamento de sistema solar térmico com: (a) termossifão e (b) circulação forçada. (Painel Solar Térmico, 2009).....	21
Fig. 3-1 – Espectro solar e espectro térmico (a) e curvas de reflectividade de uma superfície selectiva e de uma não selectiva (b) (Bogaerts & Lampert, 1983). ....	25
Fig. 3-2–Montagem experimental de uma electrodeposição (Schlesinger, 2002).....	30
Fig. 3-3 - Superfícies do tipo <i>black nickel</i> obtidas aplicando uma corrente de 2 mA/cm <sup>2</sup> .....	34
Fig. 3-4 - Superfícies do tipo <i>black nickel</i> obtidas aplicando uma corrente de 4 mA/cm <sup>2</sup> .....	34
Fig. 3-5 - Superfícies do tipo <i>black nickel</i> obtidas aplicando uma densidade de corrente de 4 mA/cm <sup>2</sup> e para tempos de deposição dos 15 segundos aos 2 minutos com intervalos de 15 segundos entre si (a-15s; b-30s; c-45s; d-60s; e-75s; f-90s; g-105s; h-120s). ....	35
Fig. 3-6 - Montagem experimental para medição da emissividade de superfícies: 1 – banho termostatado; 2 – sistema de medição da radiação emitida pela superfície; 3 – fonte de alimentação do sistema de medição; 4 – controlador de temperatura do banho termostatado; 5 – termómetro; 6 – multímetro; 7 – placas de cobre utilizadas para calibração e ensaio do sistema. ....	37
Fig. 3-7 – Pormenor da ligação do banho termostatado ao suporte das amostras: (1) depósito de água com bomba de circulação no interior; (2) controlador de temperatura do banho; (3) chapa de cobre para suporte das amostras.....	38
Fig. 3-8 – Componentes exteriores da caixa de medição de emissividades: (1) suporte para as amostra; (2) Talhador mecânico; (3) Motor eléctrico DC para rotação do talhador.....	39
Fig. 3-9 Esquemático do condicionador de sinal implementado para utilização com o detector piroeléctrico.....	40
Fig. 3-9 – Detalhe do sistema de medição das emissividades: 1 – colimador cilíndrico utilizado para fixação do sensor piroeléctrico ao painel frontal da caixa; 2 – circuito impresso do amplificador síncrono. ....	41

Fig. 3-10 – Superfícies utilizadas para a calibração do sistema: 75% de Cobre e 25% de Preto (1), 50% de Cobre e 50% de Preto (2), 25% de Cobre e 75% de Preto (3).....	42
Fig. 3-11 – Curvas obtidas nas medições das superfícies utilizadas para calibração do sistema. ....	42
Fig. 3-12–Gráfico de emissividade em função da tensão para uma temperatura de 80°C. ....	44
Fig. 3-13 – Curva de medição $V_{RMS}(V)$ em função de $T^4(K^4)$ de uma placa branca .....	44
Fig. 3-14 – Diagrama de blocos para enumeração dos passos envolvidos na medição de reflectividades das superfícies .....	48
Fig. 3-15 - Pormenor do monocromador: (1) caixa com lâmpada e lentes; (2) sistema de controlo dos comprimentos de onda e ligação à fibra óptica e (3) filtro vermelho.....	48
Fig. 3-16 - Pormenor do interior da caixa: (1) fonte de luz do sistema: (2) lentes concentradoras de radiação; (3) talhador mecânico e orifício de entrada de radiação no regulador de comprimento de onda. ....	49
Fig. 3-17 - Pormenor do sistema regulador dos comprimentos de onda: (1) caixa onde a luz é filtrada; (2) filtro vermelho; (3) ranhura de inserção do filtro vermelho; (4) cabo de fibra óptica.....	50
Fig. 3-18 - Vista pormenorizada da esfera integradora: (1) porta amostras e (2) esfera integradora. ...	50
Fig. 3-22 – Gráfico das reflectividades para as placas depositadas com $i=2 \text{ mA/cm}^2$ .....	52
Fig. 3-23 - Gráfico das reflectividades para as placas depositadas com $i=144 \text{ mA}$ .....	54
Fig. 3-24 - Gráfico das reflectividades para as placas depositadas com $i=144 \text{ mA}$ e metade dos tempos de deposição .....	55
Fig. 3-25 – Comparação de curvas de reflectividade espectral;(a) curva adaptada de medidas feitas na Escola de Engenharia de Rapperswil, Suíça. (Santelices, 1991); (b) curva obtida com $i=144 \text{ mA}$ e tempo de deposição de 2 minutos.....	57
Fig. 4-1 – Curvas de rendimento de um absorsor não selectivos e de alguns absorsores selectivos.....	59
Fig. 4-2 – Curvas de rendimento dos absorsores selectivos e da tinta da SOLEC .....	60

## **1. Estrutura da Tese**

Este trabalho tem por objectivo o desenvolvimento de absorsores selectivos para utilização em sistemas solares térmicos numa perspectiva de auto-construção. Encontra-se dividido em 4 partes.

Numa primeira parte, capítulo 2, é feita uma introdução ao trabalho proposto contextualizando-o em termos de necessidades energéticas, o actual panorama financeiro que faz com que surjam alternativas de fornecimento de energia a baixo custo e a actual situação do mercado solar térmico a nível mundial, europeu e nacional. Continuando neste capítulo analisa-se o que é a auto-construção e alguns dos países onde esta tem maior impacto. Posteriormente é introduzida a temática dos colectores solares, definindo-os em termos de objectivos, principais características, diferentes modelos de colectores e funcionamento de um sistema solar térmico, sendo que o colector mais importante neste caso será o colector plano.

No capítulo seguinte (3) é introduzida a noção de superfície selectiva e as características que fazem as superfícies terem um comportamento selectivo. São abordados alguns métodos de obtenção de superfícies selectivas e é explicado o método utilizado neste trabalho. Seguidamente é feita uma caracterização das superfícies obtidas, explicando os métodos utilizados para esta caracterização, com o objectivo final de determinar a selectividade das superfícies.

No capítulo 4 é feita uma comparação em termos de rendimento entre um colector solar com superfície selectiva e sem superfície selectiva, utilizando os valores de selectividade obtidos neste trabalho.

Por fim são tiradas conclusões sobre os procedimentos e resultados apresentados durante este trabalho e é proposto algum trabalho futuro que poderá contribuir para o melhoramento destas superfícies.





## 2. Introdução

É de senso comum que os problemas energéticos, nomeadamente na oferta de energia, tenderão a agravar-se se se continuar a basear todo o consumo de energia nos combustíveis fósseis, uma vez que este tipo de combustíveis é de fonte não renovável<sup>1</sup>.

A oferta de combustíveis fósseis encontra-se numa fase descendente em termos de oferta, o que levará a uma situação insustentável se não houver uma mudança de políticas e de prioridades no que toca à oferta energética. Prevê-se que o pico de oferta de petróleo surja muito antes do pico de procura, tendo em conta as últimas previsões feitas pela A.I.E.<sup>2</sup>, que apontam para uma constante subida no consumo energético devido em grande parte ao desenvolvimento muito rápido das economias emergentes, como é o caso da China, Índia ou Brasil, onde se verificaram crescimentos anuais na ordem dos 5%.

Outra consequência do consumo deste tipo de combustíveis é a problemática (cada vez mais estudada) das alterações climáticas endógenas, que são consequência directa dos comportamentos humanos em termos de consumo de combustíveis. Com o consumo quase desenfreado dos combustíveis de origem fóssil que se tem verificado no século passado, com maior intensidade na segunda metade do século XX e no início deste século, a emissão de gases com efeito de estufa (GEE)<sup>3</sup> intensificou-se, o que fez com que os valores de concentração destes gases atingissem níveis nunca antes registados. Estas altas concentrações atmosféricas de GEE poderão tornar-se num problema de saúde pública.

Por outro lado, e devido aos problemas mencionados acima, tem-se procurado encontrar alternativas à utilização dos combustíveis fósseis que passam pela utilização de fontes renováveis de energia, como o Sol, a água ou o vento.

Estas fontes de energia caracterizam-se por serem inesgotáveis à escala humana, dando a possibilidade de serem consumidas quase ininterruptamente sem a preocupação de se poder assistir ao final das suas reservas. No entanto, a utilização destas fontes energéticas apresenta alguns problemas que poderão ser ultrapassados num futuro próximo devido à forte aposta que está a ser feita na investigação e desenvolvimento deste tipo de tecnologias um pouco por todo o mundo.

Os principais problemas recorrentes das energias renováveis estão associados à sua variabilidade: na energia solar, como é sabido, não existe fonte de energia durante a noite, havendo ainda um fenómeno aleatório que tem que ver com a nebulosidade do céu que impede o aproveitamento de energia por parte do Sol; na energia eólica o vento não apresenta um comportamento constante em termos de velocidade. Existem também fenómenos de variabilidade regional (por diferentes condições climáticas de região para região). Além disso não são acessíveis a grande parte da população

---

<sup>1</sup> Fonte que se renova a uma taxa menor que a sua taxa de consumo, são fontes que se extinguem à medida que são consumidas e quando a extinção acontece não há maneira de regenerar estas fontes.

<sup>2</sup> Agência Internacional da Energia

<sup>3</sup> Gases potenciadores do efeito natural de estufa devido às suas altas concentrações atmosféricas, são eles: Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>), Óxido de Azoto (N<sub>2</sub>O), Metano (CH<sub>4</sub>), Hidrocarbonetos (HFCs), Perfluorocarbonetos (PFCs) e Hexafluoreto de Enxofre (SF<sub>6</sub>)

mundial, dado que ainda é necessário um grande investimento inicial para usufruir de fontes renováveis, nomeadamente no sector doméstico. Porém a tendência é que se consiga baixar os preços actualmente praticados para a aquisição de tecnologias que façam uso de fontes renováveis, e tentar minimizar os problemas de variabilidade recorrendo a técnicas de armazenamento e transporte de energia eficazes.

A preocupação em utilizar estes recursos aumentou nos últimos 15/20 anos, período em que se começou a perceber as reais implicações da utilização quase irracional dos combustíveis fósseis, quer devido à sua falta, quer devido aos problemas associados à sua utilização.

Neste período notou-se também um grande avanço em I&D nesta área porque se verificou que o investimento em energias renováveis tenderá a ser mais barato do que o investimento no petróleo, dado que a tendência é que o preço deste aumente uma vez que actualmente nos encontramos em período de “*peak oil*”<sup>4</sup>, isto significa que nos dias de hoje se estão a atingir os valores máximos de extracção de petróleo tendo em conta as reservas existentes e as projectadas (de Almeida & D. Silva, 2009). Uma vez atingido este pico a extracção e produção entrará em declínio, sendo que agora se poderá estar a atravessar uma época crucial para a definição de um novo paradigma energético, onde as energias renováveis poderão desempenhar um papel fundamental.

Já em alguns períodos do século passado tinham surgido preocupações em desenvolver tecnologias que utilizassem fontes renováveis de energia, especificamente com as crises do petróleo nos anos 70, mas após a resolução dessas crises os combustíveis fósseis voltaram a ser utilizados massivamente, por serem baratos, disponíveis e abundantes um pouco por todo o globo.

Devido à problemática da pouca acessibilidade a tecnologias de aproveitamento de fontes renováveis de energia esta tese surge no sentido de ser necessário haver um acesso alargado ao aproveitamento deste tipo de energias por parte de toda a população mundial e assim surgiu a necessidade de criar soluções de baixo custo de fabrico de equipamentos que aproveitem os recursos naturais existentes para produção energética.

Assim, o que se pretende com o presente trabalho é obter um colector solar térmico em cujo processo de fabrico se utilizem métodos e materiais de baixo custo e que possa ter um rendimento de conversão de energia rentável para utilização doméstica.

A execução desta tese vem um pouco em seguimento do trabalho realizado por João Glória no âmbito da auto-construção, sendo que neste trabalho o foco principal vai para as superfícies selectivas, com o objectivo de perceber a sua importância nos colectores solar térmicos e soluções para fabrico destas que impliquem baixos investimentos, sendo esse um dos objectivos essenciais da auto-construção.

---

<sup>4</sup>Período temporal onde é atingida a taxa máxima global de produção de petróleo, período a partir do qual a produção de petróleo entrará em declínio gradual.

## 2.1 Recurso Solar

O Sol é uma fonte de energia por excelência, a energia solar funciona como combustível para o funcionamento do planeta: directamente (radiação electromagnética emitida pelo Sol) ou indirectamente (influência que tem no ciclo da água ou nos fenómenos atmosféricos).

A conjugação da energia proveniente do Sol com a atmosfera terrestre permite que existam as condições ideais para habitabilidade do planeta.

A quantidade de radiação emitida pelo Sol para o espaço equivale a uma potência na ordem dos  $3.8 \times 10^{20}$  MW, sendo que apenas uma pequena fracção desta potência é interceptada pela Terra, cerca de  $1.7 \times 10^{14}$  kW, o que significa que o que chega ao nosso planeta corresponde a 0,0000045% do total emitido pelo Sol. Ainda assim estima-se que a quantidade de radiação solar recebida pelo nosso planeta durante 30 minutos seria suficiente para cobrir as necessidades energéticas de todo o planeta durante um ano (Kalogirou, 2004).

Estes factos revelam a importância que o Sol deve ter na definição do novo paradigma energético, pois o Sol é uma fonte inesgotável, à escala humana, e a sua utilização não acarreta emissões de gases nocivos para a atmosfera na produção de energia.

### 2.1.1 Recurso Solar em Portugal

Em termos europeus Portugal é um país privilegiado no que respeita ao recurso solar uma vez que é dos países que apresenta melhores valores anuais de energia solar recebida por unidade de área como pode ser visto na figura abaixo (Fig. 2-1).

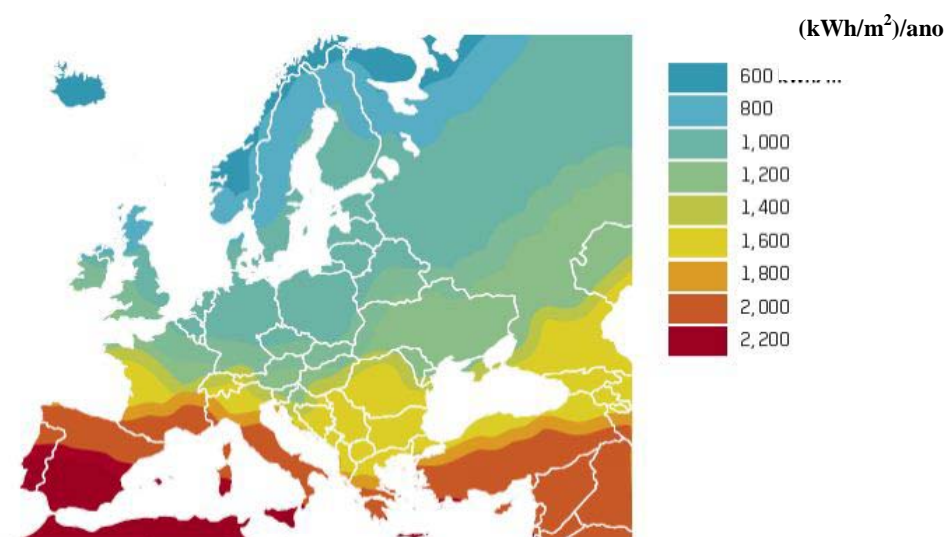


Fig. 2-1 – Mapa da irradiância solar anual na Europa expressa em (kWh/m<sup>2</sup>)/ano (Sapa Solar, 2011).

Observando o mapa é de notar os altos valores de radiação que atingem Portugal, na ordem dos 2000 (kWh/m<sup>2</sup>)/ano, em média para todo o país, e que são bastante superiores aos valores apresentados para o resto do continente europeu, cerca de 3,5 vezes superiores aos observados nos países da Europa do norte.

Porém, existem países com menor quantidade de irradiação solar que apostam mais em utilizar o recurso solar como fonte de energia do que Portugal, nomeadamente a Áustria na vertente térmica da energia solar, onde a média de horas de exposição solar é de cerca de 1700 (Página da Associação Austríaca de Poupança de Energia, 2010) enquanto que em Portugal o número de horas varia entre as 2200 e 3000 horas (Loureiro, 2009) de exposição solar anual consoante a região do país, o que obviamente significa que durante um ano Portugal tem maior tempo de exposição solar do que a Áustria. Em 2008 na Áustria havia uma média de  $0,48 \text{ m}^2$  de painéis solares por habitante contra aproximadamente  $0,09 \text{ m}^2$  por habitante em Portugal, sendo que a média europeia era de  $0,054 \text{ m}^2$  (Página da Associação Austríaca de Poupança de Energia, 2010), sendo que a área de colector por habitante necessária para Água Quente Solar é de  $1 \text{ m}^2$ .

No entanto é importante referir que ultimamente têm sido tomadas medidas que podem fazer com que o mercado solar térmico em Portugal se possa expandir e colocar-se no topo europeu. Para este desenvolvimento teve grande importância o regulamento RCCTE<sup>5</sup> que potencia a evolução do mercado uma vez que obriga à utilização de colectores solares térmicos em edifícios novos de modo a incentivar o recurso a fontes de energia “limpas” e sistemas de consumo energético eficientes.

A nível nacional a distribuição da quantidade de energia solar recebida varia de norte para sul, embora de forma menos acentuada quando se compara a totalidade do território nacional continental com todo o continente europeu (Fig. 2-2). Na imagem seguinte podem ser observadas as diferenças referidas.

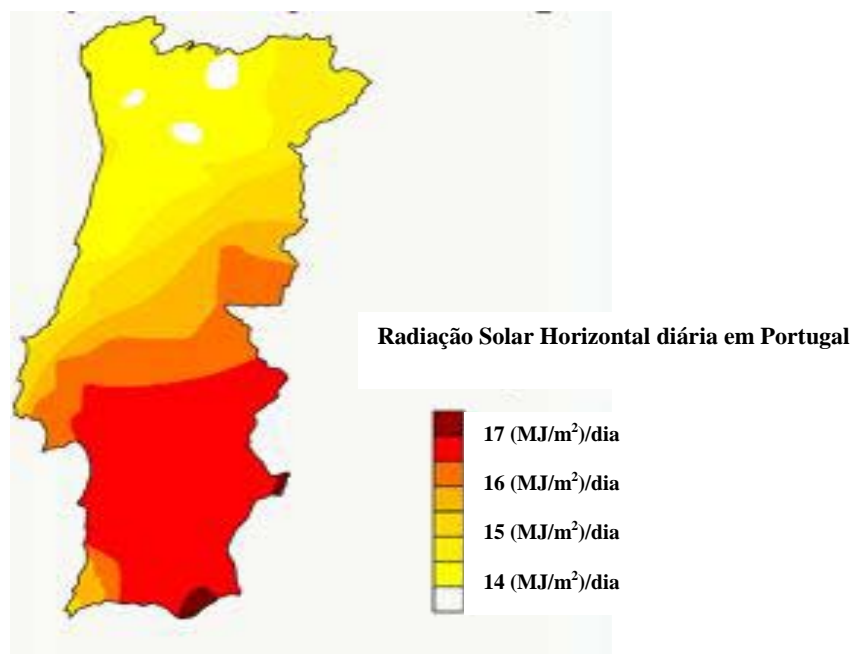


Fig. 2-2 – Mapa da distribuição de radiação solar horizontal diária em Portugal em  $(\text{MJ}/\text{m}^2)/\text{dia}$  (Portal das Energias Renováveis, 2011).

<sup>5</sup> Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios

Existem algumas diferenças em termos de radiação solar de norte para sul do país, sendo que as regiões privilegiadas para aproveitamento do recurso solar são o Alentejo e o Algarve, embora no resto do país também seja viável a implementação de sistemas de aproveitamento da energia solar para fins de consumo energético.

Todo este conjunto de factos torna evidente a ideia de que se deve apostar forte mas criteriosamente nas fontes renováveis de energia em Portugal, nomeadamente na energia solar, quer para produção de electricidade quer para produção de calor ou para aquecimento de águas. Para que esta aposta seja eficaz é necessário existirem incentivos por parte das entidades competentes de modo a tornar mais atractivo a aquisição de tecnologias de aproveitamento do recurso solar por particulares e também pelo sector empresarial.

Em termos de mercado é também necessário que se assista a uma diminuição dos preços actualmente praticados, e neste contexto a auto-construção pode desempenhar um papel fundamental contribuindo bastante para que se verifique a tal descida de preços.

## **2.2 Mercado Solar Térmico nos contextos Mundial, Europeu e Nacional**

Nos últimos 20 anos tem-se vindo a assistir a um crescimento intenso do sector da energia solar térmica, sendo que este período é coincidente com o acentuar das preocupações de cariz ambiental um pouco por todo o planeta. Estas preocupações têm que ver com o grande aumento de emissões de gases nocivos para a atmosfera, nomeadamente os GEE que se prendem com o consumo quase desregrado de combustíveis de origem fóssil. A combinação destes factores e a necessidade de diversificar as fontes de produção de energia levou ao crescimento deste mercado.

É importante reduzir a dependência da utilização de combustíveis de origem fóssil devido às razões ambientais acima mencionadas mas também por razões geopolíticas, uma vez que grande parte do petróleo importado em Portugal tem origem em países que se encontram em zonas do globo politicamente instáveis, nomeadamente o Médio Oriente.

### **Mercado Mundial**

Em termos globais, em finais de 2009, a produção energética com origem em sistemas solares térmicos foi de cerca de 140000 GWh, que corresponde a uma área total de colectores instalados de 246,2 milhões de metros quadrados e uma capacidade de operação instalada de 172,4 GW<sub>th</sub> distribuídos por 53 países. Esta capacidade instalada quando comparada com a utilização de fontes de energia não renováveis equivale a uma redução de consumo de petróleo na ordem de 14,4 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (Tep)<sup>6</sup> e a uma redução de emissões de CO<sub>2</sub> na ordem dos 46 milhões de toneladas (Weiss & Mauthner, 2011).

---

<sup>6</sup> Tep- unidade de medida de energia que se define como sendo o calor libertado no processo de combustão de 1 tonelada de petróleo puro. 1 tep = 42 GJ

No gráfico seguinte Fig. 2-3 são apresentados dados que mostram uma estimativa para a energia produzida a partir de fontes renováveis de energia e capacidade total instalada em 2010. Foi previsto que se tenham atingido os 280 milhões de metros quadrados de colectores solar térmicos instalados, correspondendo a uma capacidade de 196 GW<sub>th</sub>.

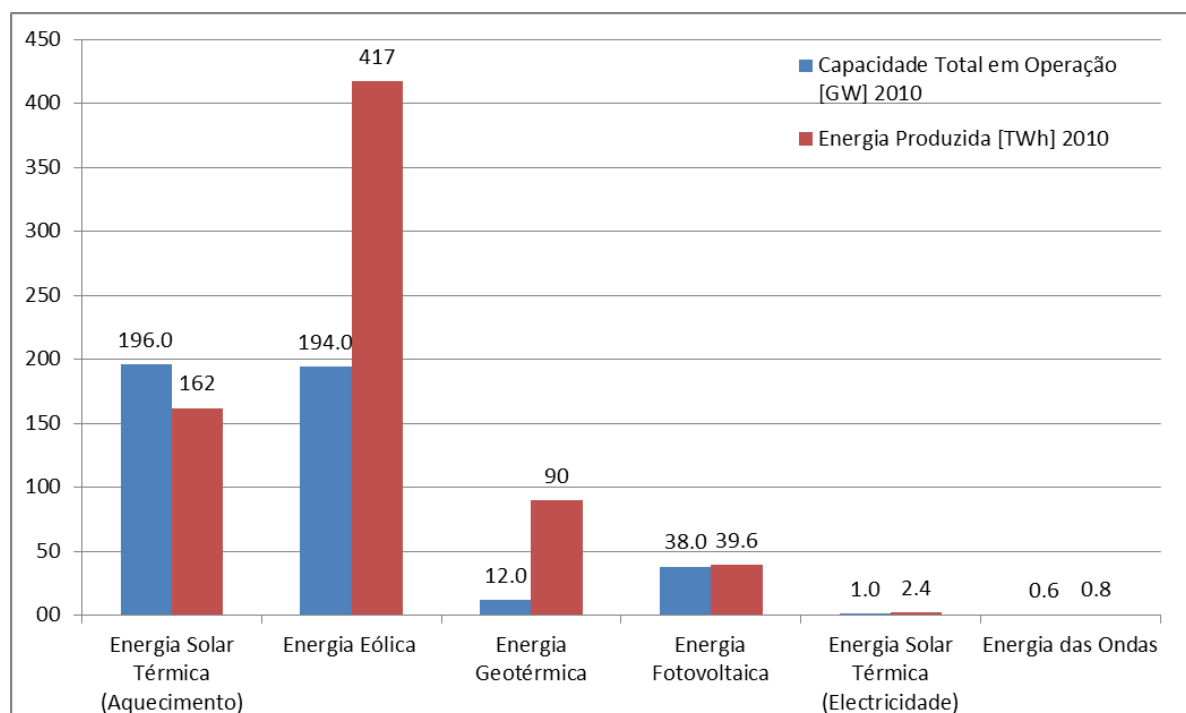


Fig. 2-3 – Capacidade total mundial instalada e energia produzida considerando várias fontes renováveis de energia (Adaptado de Weiss & Mauthner, 2011).

Pela observação da Fig. 2-3 é fácil verificar que de entre as fontes energéticas referidas, a energia eólica é a que tem maior produção anual, no entanto, ao ser feita a comparação com a energia solar térmica, está-se a comparar usos finais diferentes para estas duas fontes energéticas, dado que a energia eólica é exclusivamente utilizada para produção de energia eléctrica e a energia solar térmica é utilizada na sua essência para necessidades de aquecimento de águas sanitárias e também climatização, sendo que também existem aplicações em que o solar térmico é utilizado para produção de electricidade, embora pouco significativas, como pode ser visto na Fig. 2-3.

Porém, na Fig. 2-3, não se teve em conta a produção de energia eléctrica através de barragens (energia hídrica) e por combustão de biomassa.

Como foi acima referido, os colectores que se encontravam em operação até finais de 2009 estavam distribuídos por 53 países, representando representam cerca de 61% da população mundial. Na Fig. 2-4 é possível observar a distribuição da capacidade total instalada de colectores solar térmicos.

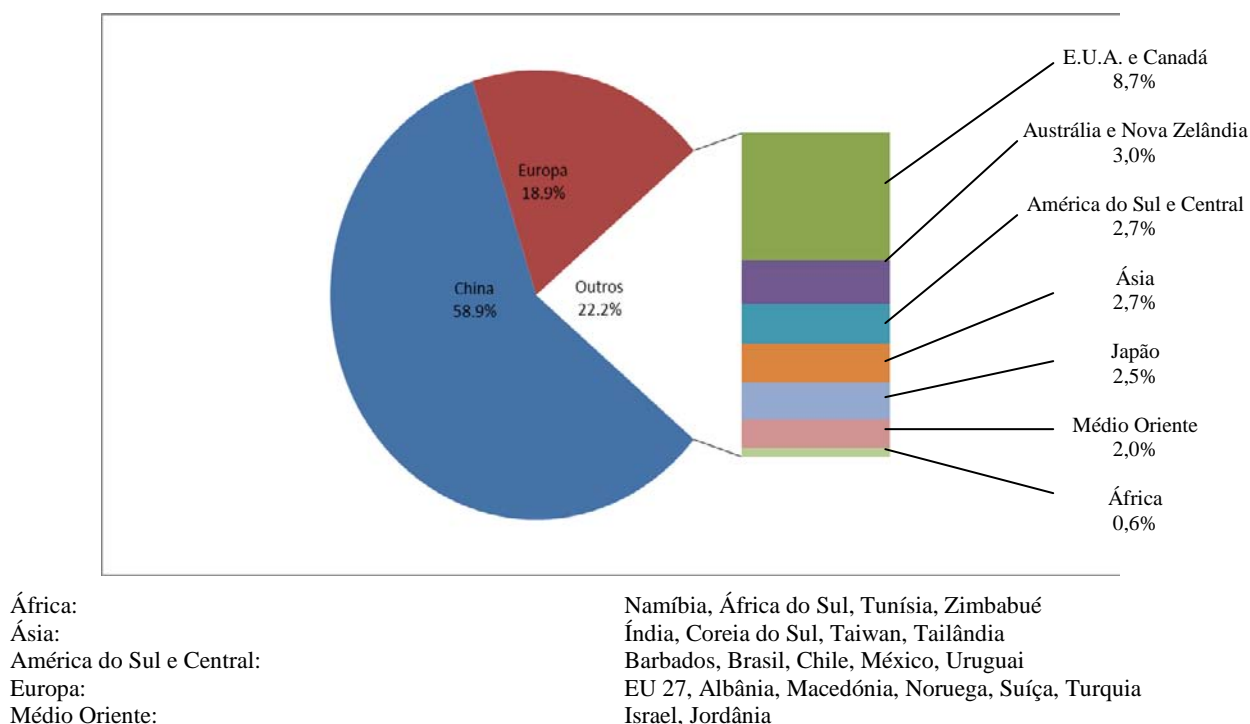


Fig. 2-4 – Distribuição da capacidade total instalada de colectores solar térmicos em operação por regiões económicas até final de 2009. (Adaptado de Weiss & Mauthner, 2011).

Este gráfico ilustra bem o que têm sido os últimos anos em termos económicos, com a China a colocar-se na dianteira no que diz respeito a colectores solar térmicos em funcionamento. Ultimamente tem-se assistido a um crescimento brutal da economia chinesa, que a tem colocado em lugares de topo em vários sectores económicos, e o sector da energia solar térmica não é excepção. No entanto é importante salientar que o facto de o território chinês ser bastante maior do que o dos outros países, poderá também ter um grande contribuição para a quantidade de sistemas solares térmicos instalados.

Apesar da localização privilegiada em termos de incidência de radiação solar, Portugal ainda se encontra bastante atrasado: existem países nos 10 primeiros lugares que não possuem os mesmos recursos que Portugal, como Áustria e Alemanha, no entanto fizeram uma aposta nas tecnologias renováveis com aproveitamento do recurso solar, nomeadamente no solar térmico que se revelou vir a ser uma aposta com sucesso.

## Mercado Europeu

Em relação ao continente europeu a tendência de subida na capacidade instalada, que se vinha a verificar, inverteu-se nos últimos dois anos, o que poderá dever-se à grave crise económica que se faz sentir um pouco por todo o mundo desde 2008. De seguida (Fig. 2-5) está um gráfico demonstrativo desse efeito.

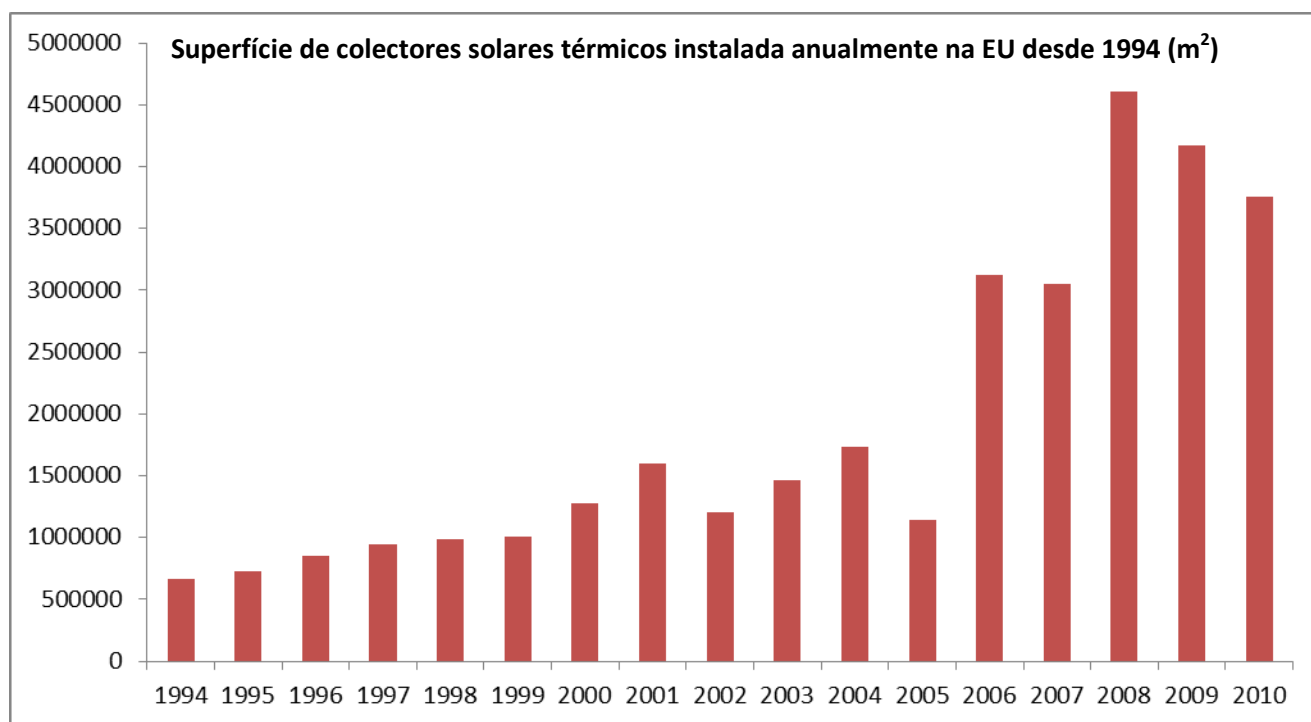


Fig. 2-5 – Área instalada de colectores solares térmicos na EU desde 1994, (2010 é uma estimativa, relativamente aos países pertencentes à União Europeia até à data)(Adaptado de EurObserv'ER, 2011).

A história recente da análise da capacidade instalada de colectores solares térmicos na EU nunca se tinha verificado uma tendência de descida em dois anos consecutivos (2008/2009 e 2009/2010), tendo para isto muito contribuído a grande descida verificada na Alemanha, país líder do mercado europeu de solar térmico (EurObserv'ER, 2011). O mercado solar térmico está muito relacionado com o contexto económico-financeiro em que está inserido e com o preço das alternativas energéticas, nomeadamente o petróleo (WorldOils, 2012). Com a crise que se tem vindo a sentir o preço do petróleo baixou e tornou-se mais difícil investir no solar térmico, levando a que o mercado se ressentisse.

A tabela seguinte mostra a área de colectores solares térmicos instalada nos anos de 2009 e 2010 na Europa a 27.



Tabela 2-1 – Capacidade total instalada nos países europeus até 2009 e estimativa para o ano 2010  
(Adaptado de EurObserv'ER, 2011)

Países	População	Capacidade Instalada 2009		Capacidade Instalada 2010	
		m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup> per capita	m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup> per capita
Alemanha	81.799.600	12.909.000	0,158	14.044.000	0,172
Áustria	8.169.929	4.330.000	0,530	4.610.000	0,564
Grécia	11.606.813	4.076.200	0,351	4.079.200	0,351
Itália	59.715.625	2.014.875	0,034	2.503.949	0,042
Espanha	46.777.373	1.865.036	0,040	2.203.636	0,047
França	63.601.002	1.839.025	0,029	2.100.000	0,033
Holanda	16.805.100	761.000	0,045	796.000	0,047
Portugal	10.617.192	564.066	0,053	751.711	0,071
Chipre	803.147	700.715	0,872	700.937	0,873
República Checa	10.674.947	517.252	0,048	673.252	0,063
Polónia	38.625.478	509.836	0,013	655.742	0,017
Dinamarca	5.368.854	484.080	0,090	541.546	0,101
Reino Unido	62.262.000	476.260	0,008	533.927	0,009
Suécia	9.076.744	422.000	0,046	445.000	0,049
Bélgica	11.007.020	330.713	0,030	372.151	0,034
Eslovénia	2.048.847	157.902	0,077	165.302	0,081
Irlanda	4.234.925	121.672	0,029	151.152	0,036
Roménia	22.303.552	114.300	0,005	144.300	0,006
Eslováquia	5.422.366	104.520	0,019	119.620	0,022
Hungria	10.075.034	84.264	0,008	101.264	0,010
Bulgária	7.621.337	80.000	0,010	88.000	0,012
Malta	397.499	44.867	0,113	53.267	0,134
Finlândia	5.410.233	29.000	0,005	33.000	0,006
Luxemburgo	512.000	20.161	0,039	23.161	0,045
Letónia	2.366.515	8.350	0,004	9.850	0,004
Lituânia	3.601.138	4.850	0,001	5.550	0,002
Estónia	1.294.236	2.170	0,002	2.520	0,002
<b>TOTAL EU 27</b>	<b>502.198.506</b>	<b>32.572.114</b>	<b>0,065</b>	<b>35.908.037</b>	<b>0,072</b>

A análise da tabela 2-1 permite verificar também que Portugal integra o grupo dos dez primeiros países europeus com maior capacidade instalada, apesar de se encontrar atrás de países com menores recursos em termos de radiação solar (Fig. 2-1). No entanto importa verificar os dados de capacidade instalada *per capita*, dados estes que demonstram realmente o esforço feito para cada país para a proliferação de sistemas solares térmicos. Tendo em conta que o ideal para utilização doméstica seria de 1 m<sup>2</sup> por pessoa observa-se que a média europeia está muito longe dessa meta. Em termos individuais nota-se que Chipre, Áustria e Grécia são os países onde existe mais área de colectores instalada por habitante, sendo que o Chipre está próximo do ideal com 0,873 m<sup>2</sup>/habitante.

Em relação a Portugal a área instalada é de 0,071 m<sup>2</sup>/habitante o que se encontra muito longe do 1 m<sup>2</sup> ideal.

As explicações que poderão justificar este facto são a aplicação de melhores políticas de incentivos por parte das entidades governamentais desses países, a existência de maior poder de compra ou até mesmo um problema de mentalidades e informação, que impeçam que as pessoas tenham confiança na instalação deste tipo de sistemas em suas casas.

### Mercado Português

Ao nível nacional o comportamento do mercado solar térmico dos últimos dois anos foi diferente da tendência europeia, como se poderá verificar no gráfico seguinte, Fig. 2-6.

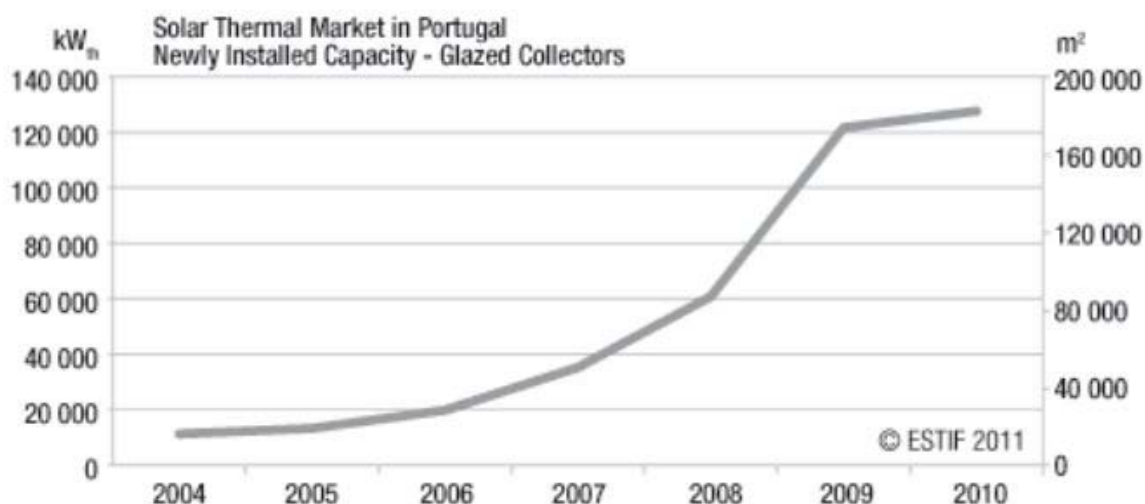


Fig. 2-6 – Evolução do mercado solar térmico em Portugal entre 2004 e 2010. (Weiss & Mauthner, 2011).

Até 2009 o crescimento do mercado foi quase exponencial tendo abrandado a partir desse ano, facto que se poderá dever à redução dos apoios fiscais e financeiros dados pelo governo, medida ligada à grave crise financeira que assolou quase todo o planeta.

Ainda assim, o facto de Portugal ter uma disponibilidade de recurso muito acima da média europeia não é concordante com a quantidade de colectores existentes no nosso país. Este facto deverá estar ligado à falta de confiança das pessoas para aquisição de sistemas deste tipo: no início da proliferação do solar térmico em Portugal as instalações eram feitas por pessoal não-qualificado, o que fazia com que existissem muitos defeitos nos sistemas solar térmicos, tornando-os pouco rentáveis.

No entanto espera-se que esta tendência se inverta e que todos os anos se verifique um aumento do mercado solar térmico em Portugal. Para isto deverão contribuir políticas e incentivos governamentais adequados e a qualificação de cada vez mais pessoal para garantir a qualidade das instalações e devolver a confiança às pessoas conjugando também uma diminuição de preços que torne o investimento em tecnologia solar térmica mais atractivo.

Com esse objectivo também surge este trabalho e o que foi desenvolvido em 2011 por João Glória numa perspectiva de incentivar a auto-construção o que desempenharia um papel importantíssimo na diminuição de preços. Se na utilização deste método de instalação se obtiverem rendimentos semelhantes aos sistemas convencionais utilizando materiais e processos de fabrico mais baratos e simples, será mais atractivo o investimento numa tecnologia deste tipo para quem, em sua casa, pretende instalar um sistema de aquecimento de águas domésticas com recurso a energia solar.

### 2.3 Auto-construção de colectores solar térmicos

O funcionamento do mercado solar térmico convencional assenta em quatro fases distintas:

- Numa fase inicial, empresas especializadas tratam os materiais que servirão de base para a produção dos componentes essenciais num sistema solar térmico;
- Posteriormente os materiais já tratados serão adquiridos por outras empresas que se especializam em moldá-los e trabalhá-los de modo a obterem como produto final componentes de um sistema solar como colectores, depósitos, válvulas, entre outros;
- Existem depois empresas especializadas em dimensionamento de sistemas e que servem como agentes autorizados, pelas empresas fabricantes, para revenda dos sistemas solar térmicos, sendo que a instalação pode ser feita por empresas especializadas em dimensionamento ou por subcontratação de outras empresas que realizem o processo de instalação;
- Por fim o produto é entregue ao utilizador final, sendo instalado de modo a satisfazer as suas necessidades energéticas.

Numa perspectiva de auto-construção, o processo de instalação de um colector solar térmico para uso doméstico seria simplificado, uma vez que o utilizador final seria também o instalador dos sistemas solar térmicos. O funcionamento do mercado da auto-construção leva a uma grande redução de custos em relação ao mercado convencional, o que é bastante vantajoso, nomeadamente para a disseminação do solar térmico pelas várias classes sociais.

A instalação de sistemas de energias renováveis, nomeadamente de sistemas solar térmicos com especial foco na auto-construção, trazem bastantes benefícios para os utilizadores deste tipo de mecanismos, e estes benefícios são obtidos em várias áreas (Glória, 2011):

- **Ambiente** – em termos ambientais as vantagens são enormes: o recurso à utilização de sistemas de energias renováveis faz com que se diminuam os consumos de combustíveis de origem fóssil, que leva a uma redução das emissões de gases nocivos para a atmosfera, nomeadamente os gases com efeito de estufa;
- **Independência Energética** – existe uma independência, por parte do utilizador, associada à utilização de sistemas solar térmicos: ao produzir a sua própria energia o consumidor deixa de ser dependente, quase na totalidade, de fontes externas de fornecimento de energia;
- **Benefícios Fiscais** – actualmente deixaram de existir, mas até 2010 o Estado Português incentivou a aquisição de sistemas solar térmicos através de apoios que englobavam a redução no pagamento de impostos e um acesso ao crédito para obtenção deste tipo de sistemas mais facilitado. Devido à grave crise financeira pela qual estamos a passar houve uma inevitabilidade em terminar com este tipo de incentivos, porém é esperado que possam ser retomados por forma a incentivar e melhorar o mercado solar térmico em Portugal.

A possibilidade de se poder ter um sistema de aquecimento de águas sanitárias ou para aquecimento doméstico de baixo custo é bastante aliciante, nomeadamente para aplicação nos países menos desenvolvidos e em que a grande maioria da população não tem capacidade financeira nem acesso a

informação que lhes permitam instalar um sistema solar térmico nas suas habitações. Assim, e recorrendo a ONG's, é possível melhorar em muito as condições de vida destas pessoas apresentando-lhes a possibilidade de poderem ter sistemas de aquecimento doméstico e de águas sanitárias com facilidade de acesso a estes sistemas, especificamente em termos financeiros criando linhas de crédito que possam ser suportadas pelas populações alvo dado que se tratam de sistemas com um processo de fabrico e de instalação baixo custo.

Actualmente já existem alguns exemplos espalhados um pouco por todo o mundo de utilização do método de auto-construção de colectores solar térmicos. Nos países onde é utilizado este sistema foram criadas associações que pretendem divulgá-lo pelas populações, recorrendo a processos de formação em auto-construção que possibilitam a qualquer pessoa saber montar um sistema de aquecimento com recurso a energia solar na sua própria casa. Normalmente as associações que possibilitam estas formações são organizações sem fins lucrativos que pretendem apenas a disseminação e promoção da utilização de energia solar térmica por via da auto-construção. Os países nos quais se tem dado mais atenção e importância a este método são o Brasil, E.U.A., Áustria e Suíça.

### **Brasil**

Sendo o Brasil um país com uma grande superfície e com um recurso solar imenso, foi criada uma associação com o intuito de disseminar a técnica da auto-construção fazendo com que os utilizadores se tornassem quase independentes energeticamente no que diz respeito a aquecimento de águas, com um investimento reduzido, tornando a aquisição de sistemas de aquecimento de águas com recurso a energia solar mais acessível para todas as classes sociais.

Tal era possível utilizando materiais baratos e facilmente obtidos e recorrendo a uma formação que permitia que qualquer pessoa, mesmo sem formação académica na área, estivesse habilitada a montar sistemas deste tipo. Esta associação chama-se *Sociedade ao Sol*, tendo surgido pela primeira vez em 1992 no Rio de Janeiro, na feira agregada à Cimeira da Terra, apresentando um protótipo do actual ASBC (Aquecedor Solar de Baixo Custo).

A partir desse momento a associação empenhou-se a fundo na melhoria do protótipo com o objectivo de o tornar um modelo de aplicação nacional, e em 2001 apresentou à sociedade brasileira o primeiro modelo de um colector solar de baixo custo. Desde essa altura que a difusão deste tipo de sistemas tem sido importante e tem feito com que cada vez mais lares brasileiros estejam equipados com sistemas solar térmicos, sendo a meta desta associação a instalação de um colector solar em cada lar brasileiro.

O grande crescimento da *Sociedade ao Sol* deve-se principalmente ao meio social em que está inserido, já que uma das principais fontes de consumo energético das famílias brasileiras é a utilização do chuveiro eléctrico, fortemente utilizado no Brasil devido a dificuldades na distribuição de gás pelas principais cidades, dado que redes de distribuição eram inexistentes.

Este chuveiro tem na sua constituição uma resistência eléctrica que faz com que a água aqueça ao entrar em contacto com a resistência. Tal sistema é energeticamente ineficiente e dispendioso para a

grande maioria das famílias, com gastos anuais na ordem dos 170 € apenas em banhos, e como tal tornou-se urgente encontrar uma solução que não sobrecarregasse tanto os agregados familiares em termos financeiros, passando pela criação do ASBC. Este acarreta um investimento inicial na ordem dos 130 euros, o que faz com que o sistema seja pago em 9 meses e comece a dar lucro a partir daí quando comparado com o chuveiro eléctrico (Sociedade do Sol, 2009). O tempo de retorno pode ainda ser comparado com o de um sistema de aquecimento de águas com recurso a energia solar convencional, onde o tempo de retorno do investimento é considerado aceitável nos 9 anos, portanto, em termos financeiros, a aplicação do ASBC apenas traz vantagens.

No Brasil as normas de boa prática são diferentes das da União Europeia devido a diversas razões como são as condições sociais, económicas e climáticas que existem. Estas diferenças levam a que as normas sejam adaptadas a cada realidade e modo de vida considerando os recursos existentes. Assim, adaptar um sistema deste tipo para utilização em Portugal implicaria alterações no seu modo de funcionamento o que iria encarecer o preço de instalação do sistema, isto faria com que o tempo de retorno do investimento fosse mais longo do que aquele que se verifica no Brasil.

No entanto não seria de ignorar a adaptação do sistema brasileiro para o nosso contexto porque poderia trazer inúmeras vantagens como a utilização do recurso solar e uma possível disseminação do conceito de energia solar térmica por todo o país devido aos baixos custos de investimento. Tendo em conta a grave crise financeira pela qual estamos a passar seria de novo possível apostar em sistemas solar térmicos com apoios estatais cujos custos não teriam que ser tão avultados como na instalação de sistemas convencionais (Glória, 2011, Sociedade do Sol, 2009).

### **Estados Unidos da América**

Neste caso as iniciativas com vista à disseminação da auto-construção solar térmica têm partido de acções individuais associadas ao conceito *Do It Yourself* (faça você mesmo) sendo que para este contexto cada pessoa adquire os materiais e monta o sistema, sem ter qualquer tipo de formação por não existirem associações ou instituições com esse propósito, sendo fácil de encontrar na internet *websites* onde se explica o conceito e se demonstra como obter um sistema solar térmico sem o recurso a mão-de-obra externa.

John Canivan, que se tem empenhado bastante no conceito de auto-construção de colectores solar térmicos nos EUA é um construtor/inventor que se começou a interessar pela utilização da energia solar para aquecimento doméstico em finais dos anos 70 do século passado e que em 1980 fundou a *Adirondack Solar Association*, associação esta que tinha como principal objectivo a divulgação do aquecimento doméstico com recurso à energia solar. Mais tarde John iniciou-se na concepção de colectores solares para aquecimento de águas domésticas, sendo que já lançou alguns manuais sobre como utilizar a energia solar para aquecimento, tanto de águas domésticas como do ar ambiente numa casa, sempre numa perspectiva de auto-construção. No *website* próprio, [www.jc-solarhomes.com](http://www.jc-solarhomes.com), é possível observar os projectos concebidos por John e ter acesso aos manuais por ele escritos.

O facto de estes projectos serem feitos a nível individual poderá fazer com que não sejam correspondidas as normas de boa utilização e garantias de qualidade necessárias neste tipo de sistemas. É, no entanto, de louvar o esforço de um indivíduo em divulgar as vantagens da auto-construção, ajudando o facto de os sistemas concebidos terem comportamentos aceitáveis na resposta às necessidades de aquecimento doméstico.

Existe também nos E.U.A. outro *website* virado para a auto-construção de sistemas solares. Chama-se *Build It Solar* e designa-se como sendo “*the Renewable Energy site for Do-It-Yourselfers*” (o *website* de energias renováveis para autoconstrutores). Aqui são apresentados vários projectos que utilizam a energia proveniente do Sol, quer para fins térmicos quer para obtenção de electricidade. Esta iniciativa surge também por vontade de uma pessoa em divulgar uma forma de utilização de sistemas solar térmicos de baixo custo.

Todos estes esforços devem ser tidos em conta, nomeadamente, pelas entidades competentes, pelo facto de que com mais apoios seria bastante mais fácil a divulgação da auto-construção, fazendo com que houvesse uma maior disseminação deste tipo de sistemas, contribuindo para a diminuição significativa das facturas energéticas de vários agregados familiares com um investimento inicial baixo.

### **Áustria**

Na Áustria, a utilização de colectores solar térmicos *DIY (Do It Yourself)* teve início no início dos anos 80, estimando-se que desde essa altura já tenham sido instalados mais de 200.000 m<sup>2</sup> de colectores solares recorrendo a esta técnica.

Esta iniciativa teve como principal objectivo equipar habitações localizadas em zonas rurais com sistemas de aquecimento recorrendo à energia solar por forma a torná-las quase independentes de fornecedores externos de energia, como redes de gás ou de electricidade para aquecimento, tudo isto tirando partido de um método que envolve baixos custos de investimento. Desta forma proporcionou-se que populações mais empobrecidas e habitantes em locais remotos tivessem acesso a sistemas solares térmicos com um custo significativamente mais baixo do que a compra de um destes sistemas por via convencional.

Numa fase inicial este movimento começou por ter como raio de acção a zona leste de uma região austríaca chamada *Styria* e teve como criadores do movimento um agricultor e um engenheiro técnico que desenvolveram uma técnica de auto-construção que permitisse às populações rurais terem acesso a sistemas solar térmicos como foi acima referido. Começaram apenas na sua comunidade e através do “passa palavra” foram aumentando os pedidos para auto-construção, e por consequência a área de interesse também aumentou, estendendo-se por toda a região da *Styria* levando a que em 1986 fossem construídos tantos ou mais colectores por auto-construção do que pelo método industrial em toda a Áustria.

Em 1988 foi formada uma associação para apoio e divulgação das energias renováveis com o objectivo de promover o movimento da auto-construção de maneira mais institucional. O facto de ser uma entidade oficial possibilitava que se financiasse a auto-construção com fundos públicos, fazendo com que houvesse uma grande evolução em termos tecnológicos no fabrico e na montagem de sistemas solar térmicos autoconstruídos. Esta associação espalhou o movimento por toda a Áustria, conseguindo também extravasar as fronteiras austríacas para os países vizinhos como a Suíça, República Checa, Eslováquia, Eslovénia e algumas partes do norte de Itália (Lanz, 2005).

### **Suíça**

A Suíça é hoje um exemplo da expansão do mercado da auto-construção de colectores solar térmicos. No caso suíço o desenvolvimento deste mercado surgiu por consequência do sucesso do movimento de auto-construção na vizinha Áustria, como foi acima referido.

No início dos anos 90, e por influência do que se vinha passando na Áustria, na parte leste da Suíça começaram a surgir os primeiros projectos de auto-construção, rapidamente divulgados e tornando-se conhecidos a nível nacional.

Este reconhecimento levou a que o movimento se propagasse, fazendo com que em finais de 1999 existissem duas associações activas de autoconstrutores, a *Sebasol* e a *Solar Schweiz*, que posteriormente se fundiram e deram origem à *Solar Support*, uma associação que agrupa 22 centros regionais dedicados à auto-construção de colectores solar térmicos.

Os centros regionais acima mencionados são entidades sem fins lucrativos e têm como propósito ajudar a dimensionar, formar, educar, emprestar ferramentas e equipamentos de segurança, ajuda técnica e controlo de qualidade das instalações solar térmicas construídas pelos particulares que apliquem a técnica da *Solar Support*. Nestes centros são dadas formações às pessoas que querem montar o seu sistema, ficando igualmente qualificadas a montar qualquer sistema solar térmico que envolva auto-construção.

São obtidos com regularidade aperfeiçoamentos a nível técnico que levam a melhorias na relação qualidade/preço e também a reduções de custos e tempo despendido na montagem dos sistemas solar térmicos. Estes melhoramentos beneficiaram de tal forma o movimento de auto-construção que por volta do ano 2000 foram entregues os primeiros sistemas chave-na-mão. Neste tipo de sistemas a pessoa que pretende instalar um sistema não necessita fazer a formação de instalador, dado que a escolha da opção chave-na-mão implica que um instalador se dirija a casa das pessoas para montar o sistema.

Actualmente o preço do investimento inicial em sistemas instalados por auto-construção é metade quando comparado com o investimento em sistemas convencionais montados industrialmente, o que demonstra as vantagens financeiras que existem na aquisição de sistemas solar térmicos com recurso a instalações por via da auto-construção. Devido a este facto esta diferença tenderá a diminuir porque existem pressões no mercado do solar térmico convencional suíço com o objectivo de formar as

pessoas que estão nele inseridas para serem qualificadas em várias vertentes fazendo com que se diminua o número de intermediários no mercado de colectores solar térmicos convencionais (Sebasol, 2011).

## 2.4 Colectores Solares Térmicos

O princípio básico de funcionamento de um colector solar térmico é relativamente simples: são realizadas trocas de calor que fazem com que se transforme radiação solar em energia interna do fluído de transporte, que aquece e é usado posteriormente. O componente principal de um sistema solar térmico é a placa absorvora, onde serão feitas as trocas energéticas necessárias ao bom funcionamento do sistema. Esta superfície recebe a radiação proveniente do Sol e devido às suas propriedades converte esta radiação em calor que é transferido para o fluído de circulação do colector, que pode ser água, ar ou um fluído de transferência.

Existem múltiplas aplicações para sistemas solares térmicos, sendo que a sua diferenciação depende do intervalo de temperaturas que permitem obter (Pereira & Carvalho, 2005):

- **Baixa temperatura (<90°C)** – aplicações domésticas para aquecimento de águas domésticas (água quente sanitária) ou de piscinas, aquecimento ambiente doméstico ou em edifícios de serviços, apoio a sistemas de ar condicionado, pré-aquecimento de águas para aplicações industriais (água quente de processos). Tudo isto pode ser atingido através de colectores solares estacionários planos ou CPC<sup>7</sup>;
- **Média temperatura (entre 90°C e 150°C)** – existem várias aplicações para esta gama de temperaturas de funcionamento do sistema, como produção de vapor de processo para a indústria, sistemas de ar condicionado em que o campo de colectores é utilizado como fonte quente do ciclo termodinâmico, produção de electricidade termicamente utilizando turbinas de baixa temperatura ou processos de dessalinização;
- **Alta temperatura (entre 150°C e 300°C)** – a maior utilização de sistemas que funcionem nesta gama de temperaturas está ligada a processos industriais para produção de electricidade por via térmica;
- **Muito altas temperaturas (> 300°C)** – utilizam-se estas temperaturas para produção de electricidade termicamente recorrendo a ciclos termodinâmicos de alta temperatura. É necessário haver bastante concentração da radiação solar incidente de modo a se atingir este nível de temperaturas. Exemplo deste tipo de aplicações são as centrais de torre, em que a radiação é concentrada num ponto alto de uma torre recorrendo a um campo de colectores planos de tal forma orientados que concentrarão toda a radiação na torre, atingindo, temperaturas de funcionamento elevadas.

---

<sup>7</sup>Compound Parabolic Collectors



Existem dois grandes grupos em que é possível dividir os tipos de colectores (Kalogirou, 2004):

- **Estacionários** – aqui os colectores têm uma posição fixa em relação ao sol, sendo necessário encontrar a posição e orientação ideais de modo a tirar o máximo proveito dos colectores, tudo isto dependendo do local onde será implementado o colector, em termos de latitude. Neste tipo de sistemas inserem-se os colectores planos, os de tipo CPC e os colectores de tubos de vácuo
- **Seguidores** – este tipo de colectores tem um sistema de seguimento do Sol que lhe permite que obtenham uma captação da radiação solar mais eficaz possibilitando melhores rendimentos na conversão de radiação solar para energia térmica, quando comparados com os colectores de eixo fixo. A grande maioria dos sistemas de seguimento envolvem também processos de concentração da radiação o que faz com que ainda absorvam uma maior quantidade de radiação do que apenas um colector plano com as mesmas dimensões com sistema de seguimento solar. Deste tipo de colectores destacam-se os concentradores planos, os reflectores lineares de Fresnel, o reflector parabólico em prato e o campo de heliostatos. É importante referir que os colectores solares de concentração são utilizados em aplicações que exigem a utilização de fluídos com elevadas temperaturas (Kalogirou, 2004).

Nesta dissertação será dada maior importância apenas a colectores solares planos, dado que são os mais utilizados em aplicações domésticas, sendo para este tipo de aplicações que se desenvolverá o trabalho nos capítulos seguintes.

### 2.4.1 Colector Solar Plano

O princípio básico que define o modo de aquecimento do fluído que circula no colector já foi acima mencionado, seguindo-se agora para uma explicação mais detalhada sobre este tipo de colectores.

A Fig. 2-7 mostra os principais componentes que formam um colector solar térmico plano.

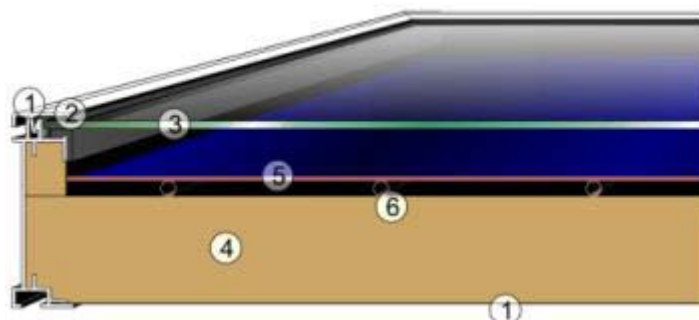


Fig. 2-7 – Imagem em corte de um colector solar plano (Carvalho, 2009)

Na figura são visíveis as diferentes partes que compõem um colector solar plano, sendo elas (Carvalho, 2009; GreenPro, 2004):

- **Caixa (1)** – a caixa pode ser obtida a partir de vários materiais: madeira envernizada, alumínio, aço ou plástico, sendo que os materiais mais utilizados são a madeira e o alumínio.

A sua função é servir como base de montagem e de sustentação dos componentes que realmente contribuem para o aquecimento de água;

- **Vedante (2)** – é de borracha e é utilizado para evitar a entrada de água da chuva, impurezas e insectos; é necessário para a manutenção da qualidade dos materiais que compõem um colector solar térmico. É colocado entre a caixa e os restantes materiais;
- **Cobertura Transparente (3)** – um colector poderia ter um funcionamento aceitável sem a colocação de uma superfície transparente, mas esta faz com que se reduzam as perdas de calor por convecção devido à criação do efeito de estufa, dado que a utilização de uma cobertura permite que não existam perdas de radiação na banda dos infravermelhos. O material mais utilizado é o vidro, idealmente com baixo teor em ferro e com uma espessura na ordem dos 3-4 mm; num vidro deste tipo o coeficiente de transmissão pode chegar aos 91% na banda do visível, o que significa que apenas se perde 9% da radiação solar incidente no vidro aquando da transferência desta para o absorsor;
- **Isolante (4)** – entre a caixa e superfície absorSORa é colocado um material isolante que reduza significativamente as perdas de calor por condução térmica para o exterior através das paredes da caixa. Este isolamento é feito recorrendo a materiais compostos por fibras minerais, dado que são estes que apresentam melhores comportamentos quando o colector atinge altas temperaturas (na ordem dos 150-200°C). É necessário ter em conta vários factores no processo de escolha do isolante, já que este não deve derreter, encolher ou libertar gases, uma vez que ao acontecer qualquer um dos três fenómenos anteriores, podem dar-se eventuais condensações no interior do colector ou corrosão dos materiais metálicos o que faria com que os colectores perdessem bastante eficácia no aproveitamento de radiação solar para aquecimento do fluído de transferência.
- **AbsorSOR (5)** – esta é a peça fundamental num colector solar térmico porque é onde se dão as trocas de calor que levam ao aquecimento do fluído de transferência que circula nos tubos. Devem ser feitos de materiais que apresentem boas características de absorção de radiação solar e de condução térmica, usando-se normalmente o cobre. Quando a radiação incide parte é absorvida e outra parte é reflectida: a radiação absorvida é transferida para os tubos de circulação onde é aquecido o fluído de transferência por condução térmica. Os colectores têm como objectivo principal a conversão da maior quantidade possível de radiação incidente em calor, que posteriormente é transferido para o fluído de transferência tentando que exista a menor quantidade de perdas possível. Assim o ideal é utilizar uma superfície absorSORa que tenha a maior capacidade de absorção possível e a menor emissividade térmica possível. Este tipo de características pode ser obtido através do tratamento da chapa metálica que será utilizada para absorção da radiação solar, fazendo com que estas se tornem superfícies selectivas e que se obtenham melhores rendimentos na conversão de radiação solar para energia térmica;

- **Tubos de Circulação do Fluido de Transferência (6)**– usualmente de cobre são soldados à placa absorvora para transferência directa de calor entre o absorvador e o fluido de transferência.

Na imagem seguinte é mostrado o balanço energético de um colector solar térmico, por onde se pode ver a importância da existência de uma cobertura transparente, na medida em que a fracção de radiação útil para o sistema seria muito menor sem a cobertura.

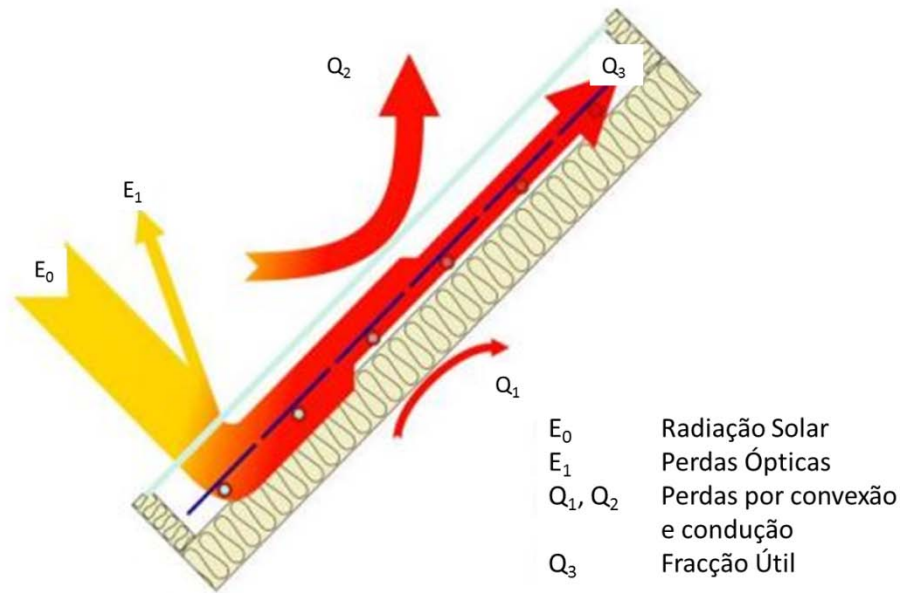


Fig. 2-8 – Balanço energético de um colector solar térmico. (Carvalho, 2009)

Em relação às formas de fazer circular o fluido de transferência existem duas vias pelas quais essa circulação pode ser feita: termossifão e circulação forçada.

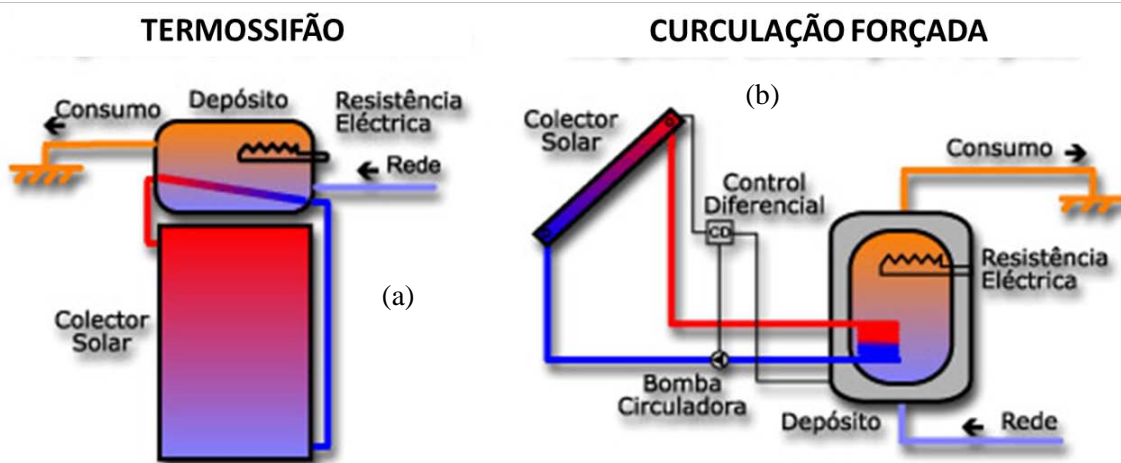


Fig. 2-9 – figura esquemática do funcionamento de sistema solar térmico com: (a) termossifão e (b) circulação forçada. (Painel Solar Térmico, 2009)

O sistema de termossifão tem o seu funcionamento baseado no princípio de deslocamento por convecção natural. Os colectores são ligados a um depósito termicamente isolado e colocado num nível superior ao dos colectores, fazendo com que o fluido de circulação se desloque até ao depósito por convecção natural (o fluido quando é aquecido fica menos denso e tem tendência a subir para o

depósito que se encontra num nível superior ao dos colectores). O fluído que se encontra a temperaturas menores dentro do depósito tende a descer para a parte mais baixa dos colectores reiniciando o ciclo de aquecimento.

Em relação ao sistema de circulação forçada não existe a preocupação de ter que colocar os colectores num nível inferior ao do depósito. Nesta situação a circulação do fluído é feita com recurso a uma bomba de circulação que força o seu deslocamento. Esta bomba está ligada a uma unidade de controlo que reage a diferenças de temperatura entre a saída dos colectores e a parte mais baixa do depósito. É ainda necessária a colocação de válvulas anti-retorno de modo a evitar que ocorra circulação inversa, que poderá acontecer quando a temperatura do fluído nos colectores é inferior à temperatura do depósito, fenómeno que apenas ocorre em dias frios e com pouca radiação solar. Poderá ser necessário instalar também mecanismos de segurança que previnam ocorrências de congelação, corrosão e que garantam um valor mínimo de pressão para circulação do fluído, dependendo do tipo de clima onde se tenciona instalar o sistema (Água Quente Solar, 2011).

Podem ser utilizados dois tipos de sistemas para a transferência de calor entre o colector e o depósito: sistemas de circulação directa e sistemas de circulação indirecta. Nos sistemas de circulação directa aquece-se directamente o fluido, por exemplo no aquecimento de águas domésticas é a água da rede que circula no colector e que será utilizada após o processo de aquecimento. No entanto este tipo de sistemas não é recomendado pelas regras de boa prática que se têm vindo a adquirir com a evolução da tecnologia, dado que poderá ser nocivo para os utilizadores.

Quando se usa um fluído de transferência significa que se optou por um sistema de circulação indirecta, onde este fluído circula num circuito primário fechado, que é o circuito que passa pelo colector. Após o aquecimento do fluído no colector este dirige-se a um permutador externo ou interno onde se efectuarão as devidas trocas de calor de forma a aquecer a água que será utilizada para os fins pretendidos pelo utilizador deste tipo de sistemas solares térmicos.

### 3. Superfícies Selectivas

Como é expresso pela lei de Stefan-Boltzmann a energia radiada por um corpo negro por unidade de área e por unidade de tempo, é directamente proporcional à quarta potência da temperatura termodinâmica do corpo:

$$I_{CN}(T) = \sigma T^4 \quad (1)$$

onde  $I_{CN}$  representa a intensidade radiada pelo corpo negro, expressa no sistema internacional em  $W/m^2$ ,  $T$  a temperatura absoluta do corpo negro expressa em  $K$ , e  $\sigma$  a constante de Stefan-Boltzmann ( $\sigma = 5,6697 \times 10^{-8} W/m^2.K^{-4}$ ). No caso do corpo negro, a distribuição espectral desta intensidade é descrita pela lei de Planck:

$$I_{CN}^{\lambda} = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda KT} - 1} \quad (2)$$

onde  $I_{CN}^{\lambda}$  representa a intensidade radiada com comprimento de onda  $\lambda$ ,  $h (= 6.626 \times 10^{-34} Js)$  a constante de Planck,  $K (= 1.381 \times 10^{-23} JK^{-1})$  a constante de Boltzmann, e  $c (= 3.00 \times 10^8 ms^{-1})$  a velocidade da luz no vácuo. As duas quantidades estão naturalmente relacionadas pela equação:

$$I_{CN}(T) = \int I_{CN}^{\lambda} d\lambda \quad (3)$$

Em geral, a intensidade radiada por uma superfície é uma fracção da que seria radiada por um corpo negro à mesma temperatura, o que se traduz pela relação:

$$I(T) = \varepsilon I_{CN} = \varepsilon \sigma T^4 \quad (4)$$

onde  $\varepsilon$  representa a emissividade da superfície em causa, uma grandeza adimensional que varia entre 0 (para uma superfície reflectora perfeita) e 1 (para um emissor ideal como o corpo negro), e depende não só do tipo de material do objecto, mas também da natureza da superfície (por exemplo, superfícies menos polidas apresentam maiores valores de emissividade). No caso em que a intensidade radiada pela superfície em causa exhibe uma distribuição espectral proporcional à do corpo negro através do mesmo factor  $\varepsilon$ , ou seja, no caso em que  $\varepsilon$  não depende do comprimentos de onda, dizemos que se trata de uma superfície cinzenta (ou de um corpo cinzento). Quando tal não se verifica, dizemos que estamos na presença de uma superfície espectralmente selectiva ou, simplesmente, uma superfície selectiva.

Como o próprio nome indica, o corpo negro é geralmente definido como sendo um corpo que absorve totalmente a radiação que incida na sua superfície, o que significa que um emissor ideal terá

necessariamente que ser um absorvedor ideal. Este facto é fácil de compreender se, à semelhança do que foi feito por Kirchhoff, fizermos a experiência conceptual simples de imaginar o que aconteceria se tal não se verificasse: se num compartimento colocássemos um objecto que numa dada gama de comprimentos de onda, a uma dada temperatura, por exemplo, absorvesse mais radiação do que aquela que emite, o resultado final seria uma tendência deste objecto para ficar mais quente do que o ambiente onde se insere, o que, naturalmente, contrariaria um princípio fundamental da Termodinâmica. Esta impossibilidade está traduzida na Lei de Kirchhoff da radiação térmica que estabelece a igualdade:

$$\varepsilon_{\lambda} = \alpha_{\lambda} \quad (5)$$

onde  $\alpha_{\lambda}$  representa a absorptividade<sup>8</sup> da superfície cuja emissividade é  $\varepsilon_{\lambda}$ . Esta igualdade tem como consequência imediata o facto de, para um corpo cinzento, não ser possível aumentar a absorção numa dada região do espectro sem que isso se traduza num aumento proporcional das perdas que inevitavelmente surgirão noutra região do espectro. No entanto, no que se refere às superfícies selectivas, é possível utilizar a dependência da emissividade no comprimento de onda por forma a otimizar a sua utilização para uma dada função.

Do ponto de vista da aplicação em colectores solares térmicos, a optimização dá-se quando as superfícies utilizadas como elemento absorvedor apresentam uma alta absorptividade para os comprimentos de onda correspondentes ao espectro solar (0,3 – 2  $\mu\text{m}$ ) e uma baixa emissividade (elevada reflectividade) para os valores de comprimento de onda correspondentes à gama dos infravermelhos (2 – 20  $\mu\text{m}$ ), região do espectro em que se dão as perdas mais relevantes de energia por emissão de um corpo que se encontre à temperatura de um colector solar – espectro térmico (Kontinen, 2000). Na Fig. 3-1(a) são apresentados dois gráficos: um correspondentes ao espectro solar e outro ao espectro térmico. A reduzida região de comprimentos de onda em que estes dois espectros se sobrepõem, está na base do tipo de optimização anteriormente referida. Na figura 3-1(b) representam-se as curvas características de reflectividade de superfícies sem qualquer comportamento selectivo, e com um comportamento selectivo bem adaptado à aplicação em colectores solares térmicos, ou seja, superfícies com uma alta absorptividade na região do espectro solar, e baixa absorptividade (e, portanto, baixa emissividade) na região do espectro térmico.

---

<sup>8</sup>Absorptividade define-se como sendo a fracção de radiação absorvida por um objecto em relação à radiação total nele incidente.

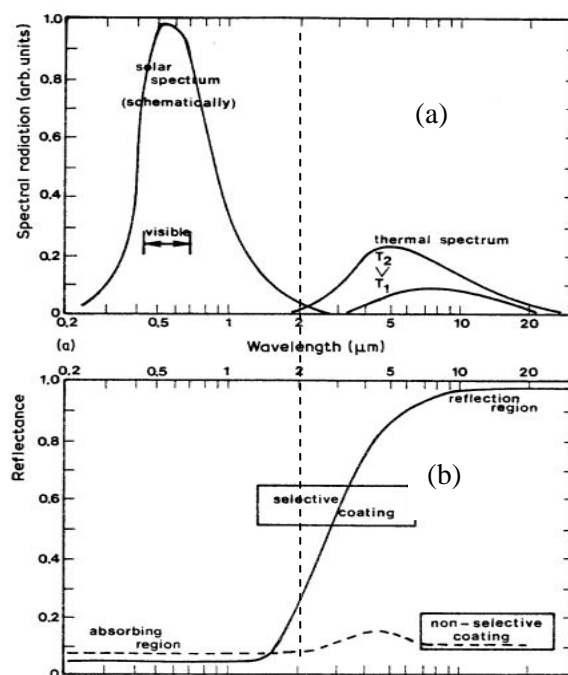


Fig. 3-1 – Espectro solar e espectro térmico (a) e curvas de reflectividade de uma superfície selectiva e de uma não selectiva (b) (Bogaerts & Lampert, 1983).

A importância da selectividade espectral na obtenção de comportamentos radiativos específicos é conhecida desde o início do século XX, existindo registos da obtenção de superfícies deste tipo datados dos anos 30 e 40. As primeiras superfícies com utilidade prática foram apresentadas numa conferência subordinada ao tema da energia solar que decorreu em Tucson, cidade norte-americana do estado do Arizona, por Harry Zvi Tabor, um físico israelita com grande parte do seu trabalho realizado no Reino Unido, que em 1955 obteve um dispositivo que conseguia melhorar para o dobro o rendimento dos colectores solares térmicos, comparativamente ao tipo de sistemas de captação de energia solar utilizados até então, minimizando as perdas de calor associadas a fenómenos radiativos e de convecção, recorrendo a um material designado por *Black Nickel*. No entanto, apenas nos anos 70, quando se deu a primeira crise do petróleo, conduzindo a um maior interesse nas energias renováveis, é que as superfícies idealizadas por Tabor ganharam força na utilização em colectores solar térmicos.

O que se pretende com este trabalho é, tal como já foi anteriormente referido, obter superfícies cujos comportamentos, quando são sujeitas à incidência de radiação, correspondam a uma alta absortividade na região espectro electromagnético compreendida entre os 0,3 e os 2 μm, e que, simultaneamente, apresentem altas reflectividades (e por consequência baixas emissividades e absortividades) para a região do espectro entre os 2 e os 20 μm. O objectivo será, portanto, a obtenção de superfícies para as quais seja máximo o quociente:

$$\frac{\alpha_s}{\varepsilon_t} \quad (6)$$

onde  $\alpha_s$  e  $\varepsilon_t$  representam, respectivamente, a absortividade na região do espectro solar, e a emissividade na região do espectro térmico, como anteriormente definidos. Este quociente pode ser

encarado como um índice de selectividade das superfícies para utilização como absorvedor solar, o que o torna importante na indústria solar térmica. Para boas superfícies selectivas este *ratio* deve ser elevado, sendo que os valores típicos encontrados na indústria da energia solar térmica estão entre os 4 e os 10 para uma superfície com uma baixa emissividade térmica. (Kivaisi & Stensland, 1982)

Neste trabalho serão obtidas medidas de emissividade térmica e de reflectividade espectral que permitam caracterizar as superfícies produzidas em termos da sua selectividade e, por conseguinte, da sua funcionalidade para utilização como elementos absorvedores em sistemas solares térmicos.

### Métodos de Obtenção de Superfícies Selectivas

A obtenção deste tipo de superfícies pode ser executada de várias formas (Chopra & Reddy, 1986; Spitz, Aubert, Behaghel, Berthier, & Rivory, 1979), sendo que todas envolvem um material base, que se designa por substrato, sujeito a um revestimento que pode ser feito de variadas formas, desde uma simples pintura utilizando tinta preta, até à deposição de diferentes materiais em cima do material tido como base. De seguida são enumerados alguns dos métodos utilizados para a obtenção de superfícies selectivas espectralmente:

- **Absorção Intrínseca** – consiste na utilização de um material que pelas suas características (nomeadamente a estrutura electrónica), possua propriedades ópticas que têm comportamentos espectralmente selectivos. Este material é depositado em cima do substrato escolhido;
- **Efeitos ópticos de *Multilayer***<sup>9</sup> – deposição de materiais com diferentes propriedades ópticas intrínsecas, no que diz respeito à selectividade espectral, que ao se complementarem melhoram substancialmente o comportamento óptico da superfície selectiva. Tipicamente empilha-se um material que absorva no comprimento de onda correspondente à radiação visível seguido de uma camada reflectora de radiação infravermelha, o que fará com que o comportamento óptico do conjunto se aproxime do pretendido;
- **Pilhas de Interferência** –recorre também à deposição de materiais com propriedades diferentes: neste método a espessura dos materiais depositados são escolhidas de modo a que existam múltiplas reflexões nas interfaces das junções entre os materiais a utilizar por forma a obter máxima ou mínima interferência<sup>10</sup> para um dado valor ou intervalo de valores de comprimentos de onda. É um método caro devido à sua dificuldade de execução;
- **Combinação de Impedâncias Ópticas** – resulta de compor as camadas a utilizar no empilhamento de modo a reduzir as perdas por reflectividade/transmissividade utilizando o efeito de variação súbita das propriedades ópticas que ocorre nas interfaces de contacto entre as superfícies.

---

<sup>9</sup> *Multilayer* refere-se ao empilhamento de diferentes materiais, criando assim múltiplas camadas (*layers*).

<sup>10</sup> Estes fenómenos acontecem quando se dá a interferência construtiva ou destrutiva das ondas incidentes e reflectidas nas interfaces.



- **Efeito da Textura das Superfícies** – ao utilizar revestimentos com texturas apropriadas torna-se possível aumentar a absorção de radiação incidente dependendo dos comprimentos de onda.
- **Efeito do Tamanho Quântico** – camadas ultrafinas e partículas com tamanhos na ordem dos nanómetros mostram propriedades ópticas que variam com o tamanho.

Para o fabrico de superfícies selectivas existem vários procedimentos, sendo os que estão enumerados de seguida mais usuais:

- **Electrodeposição** – utilização de uma corrente eléctrica (catalisador da reacção) para deposição de iões de um material presente numa solução química num substrato;
- **Deposições *Electroless*** – deposições efectuadas sem o recurso à aplicação de uma corrente eléctrica, mergulhando o substrato e o material a depositar numa solução química o que resultará na formação de uma película fina devido à reacção das substâncias químicas presentes na solução ;
- **C.V.D. (*Chemical Vapour Deposition*)** – este tipo de deposição é executado dentro de uma câmara onde são introduzidos os gases que contenham a substância que irá formar a camada fina no substrato. Devido às altas temperaturas e à composição do substrato, irão acontecer reacções que farão com que se forme a camada fina necessária à obtenção de uma superfície selectiva;
- **Deposição em Vácuo** – funciona com o mesmo princípio que o C.V.D. à excepção de que neste método todo o processo é feito a baixa pressão.
- **Co-deposição por evaporação química ou pulverização** – é um método de *Physical Vapour Deposition* (P.V.D.), à semelhança do C.V.D. é feito dentro de uma câmara apropriada e consiste em pulverizar o substrato com material que provem de uma fonte. O material depositado é pulverizado devido à reacção que acontece com o gás que é introduzido dentro da câmara de deposição.
- **Evaporação reactiva** – átomos do metal a depositar são evaporados devido à presença de um gás reactivo na câmara de deposição. Estes átomos ao entrarem em contacto com o substrato condensam, voltando ao estado sólido e formando o revestimento pretendido. Este processo é realizado em condições de vácuo, o que permite que as partículas evaporadas se dirijam directamente para o substrato.
- **Pinturas Selectivas** – é potencialmente o processo mais simples de obtenção de superfícies selectivas dado que consiste em pintar o substrato com tintas que possuem propriedades selectivas.

Apesar das variadas formas existentes para a obtenção de superfícies espectralmente selectivas, o número de soluções que efectivamente se utilizam é pequeno. Devem ser tomados em conta vários factores no momento da escolha do método de obtenção das superfícies desejadas, sendo os principais referidos de seguida (Spitz, Aubert, Behaghel, Berthier, & Rivory, 1979):

- **Propriedades Ópticas** – deverá ser o factor mais importante dado que por ele se guiará a eficácia da superfície utilizada para o efeito desejado;
- **Estabilidade Físico-Química** – é importante que as superfícies apresentem uma grande estabilidade em termos físicos-químicos, porque passa por aí a manutenção das propriedades selectivas das superfícies ao longo do tempo de utilização e de exposição às condições climáticas que poderão ser adversas para os materiais utilizados na obtenção de superfícies selectivas;
- **Custo de Fabrico** – numa perspectiva de mercado, nomeadamente na utilização destas superfícies para colectores solares, é de extrema importância o custo de fabrico de cada superfície. Não se deve descurar a qualidade da superfície em virtude de ter o processo de fabrico mais barato mas ser assegurada uma eficiência que permita cobrir as necessidades de cada cliente.

### 3.1 Fabrico de Superfícies Selectivas

Foram mencionadas anteriormente várias formas de obtenção de superfícies selectivas. Para este trabalho optou-se pelo método da electrodeposição por ser o mais simples de executar e por exigir menos equipamento do que outro tipo de métodos. Estes dois factores são de extrema relevância no quadro da autoconstrução em que este trabalho se insere: embora existam outros métodos que possibilitem a formação de superfícies selectivas de melhor qualidade relativamente ao que se poderá obter com electrodeposição, esta técnica é potencialmente acessível, com poucos recursos e menores custos. Assim, de seguida proceder-se-á à descrição do método de electrodeposição, nomeadamente os seus fundamentos teóricos e caracterização da montagem experimental adoptada neste trabalho.

#### 3.1.1 Electrodeposição

A electrodeposição é definida como sendo a aplicação de revestimentos metálicos em superfícies condutoras (principalmente metais) ou não condutoras (plásticos) recorrendo a processos electroquímicos. Este processo é feito com o intuito de alterar algumas propriedades da superfície sujeita ao revestimento: no caso deste trabalho pretende-se alterar as propriedades radiativas dos metais utilizados como substratos.

A primeira electrodeposição foi feita em 1805 pelo químico italiano Luigi Brugnatelli para executar a deposição de camadas finas de ouro em substratos de prata. Esta conquista surgiu na sequência de uma invenção feita anos antes, em 1800, por um físico italiano amigo de Brugnatelli, de seu nome Alessandro Volta, que desenvolveu a “Pilha de Volta”, o primeiro gerador estático de energia eléctrica

que envolvia processos químicos. Assim, foi possível obter a primeira deposição recorrendo a processos electroquímicos, mergulhando duas placas de prata ligadas por um fio de aço a uma “pilha de volta” numa solução contendo um sal com ouro na sua composição, resultando na deposição de ouro nas placas de prata. Devido a problemas burocráticos o trabalho de Brugnatelli foi pouco divulgado fora de Itália tendo permanecido desconhecido durante algum tempo. No entanto, processos semelhantes aos do químico italiano foram feitos no Reino Unido e na Rússia por volta de 1839, e desde essa altura até aos dias de hoje que a evolução deste método de deposição de materiais tem sido constante, tendo-se generalizado a sua utilização a nível industrial. A electrodeposição é um processo transversal industrialmente dado que é utilizado desde a indústria dos brinquedos até à de equipamentos aeroespaciais ou componentes electrónicos. (Schlesinger, 2002)

### **3.1.1.1 Fundamentos Teóricos**

Especificamente, a deposição de um revestimento metálico num substrato (objecto onde ocorre a deposição) é feita carregando negativamente o objecto onde ocorrerá a deposição e mergulhando-o numa solução, chamada electrólito, que contenha na sua composição um sal do metal a ser depositado. A solução também pode conter outras substâncias que se destinam a melhorar a qualidade da superfície final em termos de rugosidade e brilho.

Devido à aplicação de corrente eléctrica (com um papel de catalisador) os iões metálicos do sal são carregados positivamente o que faz com sejam atraídos pelo objecto onde será realizada a deposição por efeito electrostático. No momento em que os iões metálicos atingem o substrato (cátodo), que se encontra carregado negativamente, este fornece electrões reduzindo os iões positivos e fazendo com que estes tomem uma forma metálica. Este processo designa-se por electrólise. O transporte da corrente aplicada no interior do banho electrolítico é feito pelos iões carregados positivamente que se deslocam do ânodo para o cátodo que se encontra carregado negativamente. A figura abaixo ilustra uma montagem experimental simples para a execução da electrodeposição (Schlesinger, 2002):

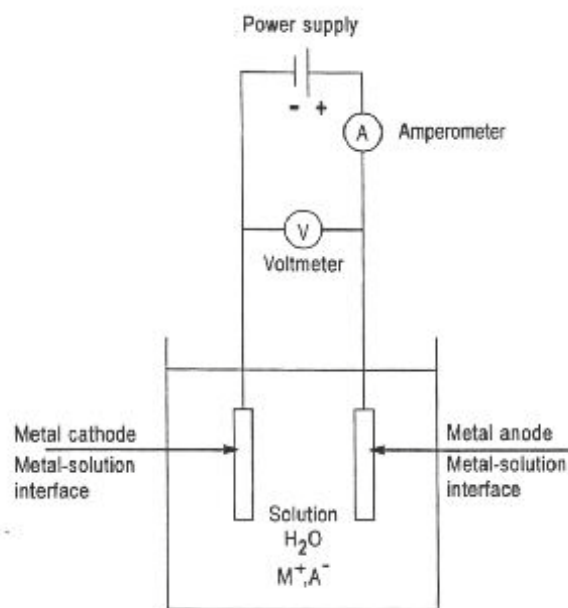


Fig. 3-2–Montagem experimental de uma electrodeposição (Schlesinger, 2002).

Na execução deste tipo de processos é essencial que as superfícies utilizadas sejam sujeitas a tratamentos iniciais que envolvem processos de limpeza e preparação da superfície, o que usualmente implica o uso de solventes, banhos alcalinos ou ácidos e superfícies abrasivas. Pode acontecer que com uma boa preparação das superfícies a utilizar o depósito não seja tão bom e eficaz quanto o esperado, no entanto é impossível obter um bom depósito sem que se executem os processos iniciais necessários para se realizar a electrodeposição com superfícies limpas. A presença de contaminantes e partículas indesejadas vai causar interferência durante o processo, prejudicando as ligações que deverão ser criadas e conduzindo a uma fraca adesão e pondo mesmo em causa a execução da electrodeposição (Schlesinger, 2002).

De modo a obter o revestimento pretendido a montagem experimental necessita estritamente dos seguintes componentes (Schlesinger, 2002):

- **Ânodo** – é utilizado o metal com o qual se pretende fazer o revestimento no substrato, no caso do esquema acima (Fig. 3-2) a deposição é feita com cobre. É onde ocorre a electrodissolução do metal;
- **Cátodo** – é composto pelo metal condutor no qual se pretende fazer o revestimento e usualmente utiliza-se o cobre. É onde ocorre a deposição;
- **Fonte de Alimentação** – fornece a corrente eléctrica necessária para a realização do processo electroquímico. Neste trabalho foi utilizada uma fonte de corrente;
- **Solução Electrolítica ou Electrólito** – a solução electrolítica é composta por electrólitos fortes (bons condutores de corrente eléctrica), essencial para o processo de deposição se concretizar. Esta solução deve conter o sal do metal a ser depositado;

- **Amperímetro** – este processo requer a aplicação de uma corrente constante, sendo necessário um instrumento que possibilite a medida da corrente aplicada de modo a poder efectuar os ajustes necessários durante a reacção;
- **Voltímetro** – necessário para a medição da tensão no circuito, mas não é essencial para o desenrolar do processo.

Nas electrodeposições os ânodos podem ser de dois tipos: ânodos sacrificiais (ânodo dissolúvel) ou ânodo permanente (ânodo inerte). Neste trabalho vai-se recorrer a um ânodo sacrificial dado que haverá electrodisolução do metal que compõe o ânodo de modo a poder obter as partículas que irão formar a película que revestirá o cátodo.

No que diz respeito à espessura da camada electrodepositada, esta costuma variar entre 0,1  $\mu\text{m}$  e 30  $\mu\text{m}$  e é afectada pela forma e pelo contorno do objecto onde será feita a deposição. Objectos com cantos afiados e formas não planas tendem a ter maior quantidade de material depositado nos cantos exteriores e menor quantidade nas áreas mais interiores. Esta diferença é causada pela deformação das superfícies equipotenciais provocadas pela forma da própria superfície, particularmente relevantes quando esta contém arestas, o que leva a um maior fluxo de corrente nos pontas mais afiadas do que nas áreas mais planas da superfície onde será feita a deposição. Para deposições que envolvam objectos com superfícies irregulares é recomendado o recurso a deposições sem a aplicação de corrente eléctrica (electroless). De modo a resolver os problemas da irregularidade das superfícies onde se executa a electrodeposição é necessário ter em atenção o posicionamento do ânodo tal como modificações necessárias na densidade de corrente a utilizar (Schlesinger, 2002).

### 3.1.2 Obtenção das Superfícies Selectivas

Para se atingir o objectivo proposto de criação de superfícies selectivas por electrodeposição, optou-se por depositar níquel em chapas de cobre para ter uma superfície selectiva com boas propriedades ópticas utilizando materiais e métodos de fabrico baixo custo. O tipo de superfícies que se obterão no fim da execução experimental são comumente designadas por *Black Nickel*.

A aplicação de depósitos de níquel é bastante utilizada já há algum tempo em aplicações que vão desde a simples decoração de materiais até aplicações que envolvam processos de engenharia. É possível usar a deposição de níquel em aplicações muito diferentes dado que este apresenta a possibilidade de poder alterar a sua aparência e outras propriedades regulando a composição e os parâmetros experimentais na execução da electrodeposição. No caso desta dissertação será realizada uma deposição deste tipo com o objectivo de se obter uma superfície com boas propriedades selectivas.

Uma vez que uma electrodeposição envolve uma solução electrolítica que contenha um sal do metal que se pretende depositar, terá que estar presente um sal de níquel, que neste caso será sulfato de níquel. Existirão também outros compostos químicos em solução que servem para dotar a superfície criada com propriedades selectivas convenientes.

Assim, os compostos químicos envolvidos na criação deste tipo de superfícies selectivas e respectivas quantidades são apresentadas seguidamente. A diluição destes compostos é feita com 1 litro de água (Santelices, 1991):

- 75 g de Sulfato de Níquel –  $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
- 28 g de Sulfato de Zinco –  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
- 24 g de Sulfato de Amónio –  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$
- 17 g de Tiocianato de Amónio –  $\text{NH}_4\text{SCN}$

Relativamente aos compostos constituintes do banho electrolítico, o sulfato de níquel é o sal necessário para a execução da deposição, contribuindo também para a atribuição e manutenção da cor negra na superfície sujeita a deposição, o sulfato de zinco é utilizado para manter a durabilidade da cor da deposição (neste caso preto) dado que melhora a adesão entre os materiais, o sulfato de amónio serve como diminuidor do pH da solução e o tiocianato de amónio é o responsável pela cor negra da deposição, sendo também usado como elemento que previne a criação de óxidos e permite que exista uma maior adesão dos iões metálicos de níquel no substrato de cobre. O material resultante da deposição será uma mistura de níquel, zinco, sulfureto de zinco ( $\text{ZnS}$ ) e sulfureto de níquel ( $\text{NiS}$ ). (Wäckelgard, 1998).

No processo aqui descrito o cátodo é o substrato onde será realizado o depósito que formará a superfície selectiva (placa de cobre) e o ânodo é uma placa de zinco que com a aplicação de uma corrente eléctrica irá libertar iões metálicos que serão depositados no substrato em conjunto com iões que se formarão a partir dos sais constituintes da solução electrolítica, dando origem a uma camada com características ópticas e radiativas que permitirá a obtenção de uma superfície. O banho electrolítico estará sujeito à aplicação de uma densidade de corrente com o valor aproximado de  $2 \text{ mA/cm}^2$ . O pH da solução deverá manter-se constante num valor de 4, e no caso de haver uma variação é recomendado usar uma gota de ácido sulfúrico de modo a poder controlá-lo. (Santelices, 1991). A temperatura do banho é de  $30^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$  e deve ser mantida constante durante todo o processo. (Santelices, 1991)

Antes da realização do banho electrolítico e seguindo as indicações para a execução de uma boa deposição, as superfícies utilizadas (placas de zinco como ânodo e placas de cobre como cátodo/substrato) devem ser sujeitas a um tratamento inicial que envolve a limpeza com superfícies abrasivas e posterior desengorduramento com etanol, por forma a eliminar partículas que se possam tornar prejudiciais durante o processo de electrodeposição. (Santelices, 1991)

De forma a se obter superfícies com o melhor comportamento selectivo possível variaram-se alguns factores como o tempo de deposição e densidade de corrente. Posteriormente serão apresentados os resultados e a interpretação dos mesmos após análise de todas as superfícies obtidas.

Para a execução destas deposições variou-se o tempo de deposição realizando deposições desde os 30 segundos até aos 4 minutos, de 30 em 30 segundos. Utilizaram-se estes intervalos de tempo para duas séries de deposições, sendo que para a primeira utilizou-se uma densidade de corrente de aproximadamente  $2 \text{ mA/cm}^2$  e para a segunda utilizou-se o dobro do valor da densidade de corrente, portanto  $4 \text{ mA/cm}^2$ . Para uma terceira série de amostras fizeram-se deposições com tempos que vão desde os 15 segundos até aos 2 minutos, de 15 em 15 segundos e utilizaram-se densidades de correntes de  $4 \text{ mA/cm}^2$ . Esta última série supõe-se que apresente resultados semelhantes aos da primeira série dado que se utiliza metade dos tempos de deposição mas o dobro das correntes utilizadas na primeira série experimental. (Santelices, 1991)

## **Resultados**

Numa primeira tentativa de produzir as superfícies selectivas propostas obtiveram-se resultados negativos, na medida em que estas apresentavam um aspecto muito diferente do desejado, em particular, a superfície obtida não era homogénea. Este facto terá acontecido devido à disposição do cátodo e do ânodo aquando da execução da electrodeposição, uma vez que esta foi feita com as duas placas inclinadas não estando as suas superfícies frente a frente, o que originou a não homogeneidade do depósito. Assim optou-se por colocar as superfícies de modo a que a face da placa de cobre (cátodo) se encontrasse a 1 cm da face da placa de zinco (ânodo) para obter superfícies o mais homogéneas possível, ainda que algumas apresentassem falhas que se poderão considerar pouco significativas. Depois deste ajuste o resultado final pode-se considerar positivo.

As chapas de cobre sobre as quais se efectuarão as deposições têm uma área de  $36 \text{ cm}^2$  o que implica o uso de correntes de 72 mA para uma densidade de  $2 \text{ mA/cm}^2$  e de 144 mA para uma densidade de  $4 \text{ mA/cm}^2$ . Na imagem seguinte (Fig. 3-3) são mostradas as superfícies que se obtiveram aplicando uma densidade de corrente de  $2 \text{ mA/cm}^2$  em períodos de tempo que vão desde os 30 segundos até aos 4 minutos. É importante salientar que as superfícies que correspondem aos 2,5 minutos, 3 minutos, 3,5 minutos e 4 minutos (Fig. 3-3 e, f, g, h) apresentam algumas manchas, que se justificam com o facto de o processo de secagem após a deposição ter sido ao ar natural, ao contrário das outras superfícies (Fig. 3-3 a, b, c, d) que apresentam um aspecto mais homogéneo por terem sido secas com ar comprimido, permitindo que a secagem seja executada de forma rápida e com muito maior homogeneidade.

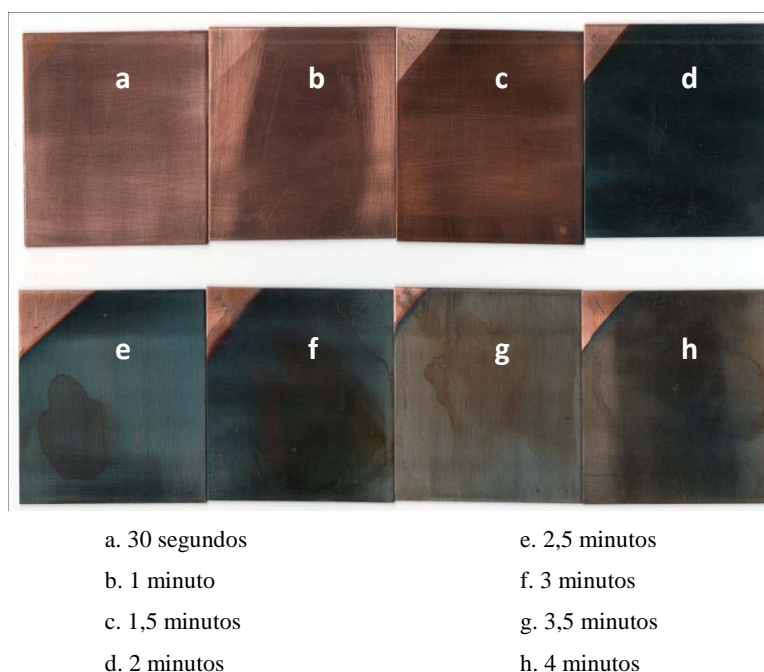


Fig. 3-3 - Superfícies do tipo *black nickel* obtidas aplicando uma corrente de  $2 \text{ mA/cm}^2$ .

Uma primeira observação sugere que a superfície que poderá apresentar uma melhor performance é a superfície (d), que esteve sujeita a electrodeposição durante 2 minutos. Esta conclusão deve-se ao facto de esta superfície ser a que tem um aspecto mais homogéneo e com uma cor preta mais carregada.

De seguida, na figura abaixo, são apresentadas as superfícies que foram sujeitas a uma intensidade de corrente com o dobro do valor da densidade de corrente aplicada nas superfícies acima representadas,  $4 \text{ mA/cm}^2$ . O propósito de variar a densidade de corrente em relação às primeiras deposições foi o de observar se se obtêm superfícies com boas propriedades emissivas com menores tempos de deposição, o que poderá ser bastante vantajoso a nível industrial numa perspectiva de obter boas superfícies rapidamente.

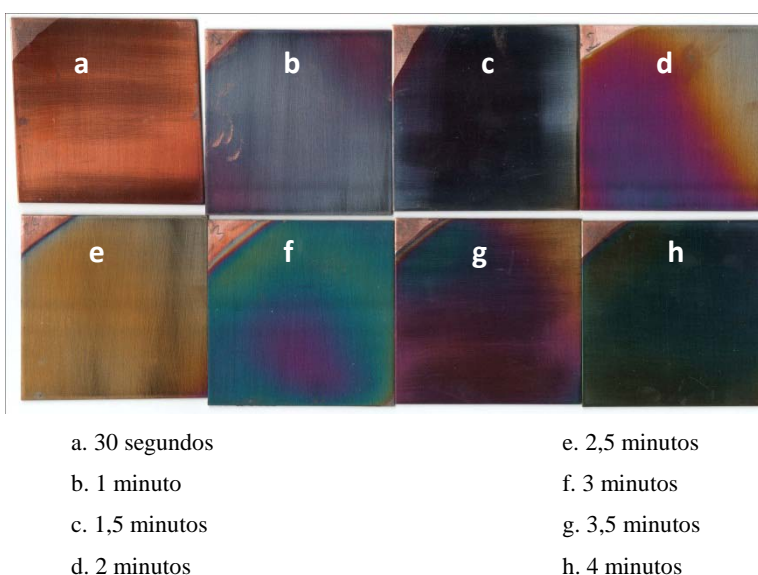


Fig. 3-4 - Superfícies do tipo *black nickel* obtidas aplicando uma corrente de  $4 \text{ mA/cm}^2$



Numa primeira análise ao aspecto das superfícies obtidas na Fig. 3-4 poderá supor-se que as superfícies que poderão obter melhor comportamento emissivo são as superfícies (c) e (h), no entanto é de estranhar o facto de a superfície (h) apresentar um aspecto escuro, dado que seria de esperar que tivesse uma cor amarelada já que é uma placa cuja deposição ultrapassou os limites do que seria suposto para uma boa placa em termos de corrente aplicada e tempo de deposição. Na teoria estes limites seriam de 1 minuto de tempo de deposição.

Comparando com as placas sujeitas a uma corrente de deposição mais baixa era de esperar que as placas (a), (b), (c) e (d) da Fig. 3-4 tivessem um aspecto idêntico às superfícies (b), (d), (f) e (h) da Fig. 3-3 respectivamente, tendo em conta que o material depositado varia de forma directamente proporcional à intensidade de corrente aplicada e tempo de deposição, tal não acontece nos pares Fig. 3-4(a)/Fig. 3-3(b) e Fig. 3-4(b)/Fig. 3-3(d). De seguida (Fig. 3-5) estão representadas as superfícies obtidas utilizando a mesma densidade de corrente que foi utilizada nas deposições das placas acima ilustradas ( $i=4 \text{ mA/cm}^2$ ), com metade do tempo de deposição, o que teoricamente corresponderá a placas semelhantes às representadas na Fig. 3-3 dado que se diminuiu os tempos de deposição em metade mas por outro lado aumentou-se a intensidade de corrente aplicada para o dobro, o que tornaria as condições de deposição semelhantes.

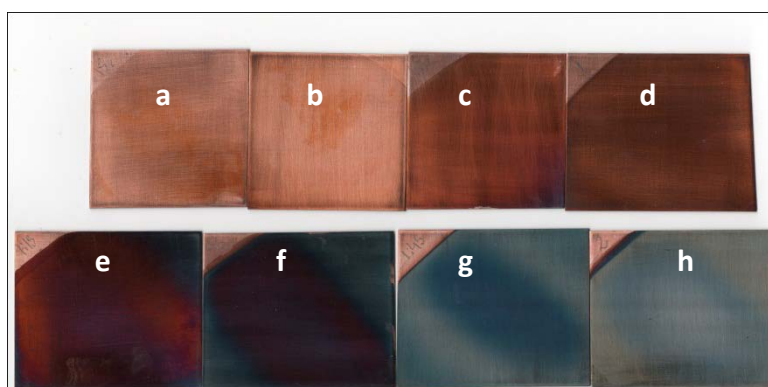


Fig. 3-5 - Superfícies do tipo *black nickel* obtidas aplicando uma densidade de corrente de  $4 \text{ mA/cm}^2$  e para tempos de deposição dos 15 segundos aos 2 minutos com intervalos de 15 segundos entre si (a-15s; b-30s; c-45s; d-60s; e-75s; f-90s; g-105s; h-120s).

Ao comparar o aspecto das superfícies obtidas a conclusão a que se chega é de que a qualidade dos depósitos não depende apenas da quantidade de massa depositada mas também depende muito da taxa de deposição, uma vez que se a taxa de deposição for elevada (correntes elevadas) a massa depositada será maior mas não terá a mesma homogeneidade de uma superfície em que a deposição tenha sido realizada com taxas de deposição menores, podendo levar a que os comportamentos selectivos das superfícies sujeitas a maiores taxas de deposição não sejam satisfatórios. Acresce que, para correntes superiores, o facto de a diferença de potencial entre os eléctrodos ser necessariamente superior, pode dar origem a reacções químicas indesejadas, com a consequente deposição de outras espécies químicas. Posteriormente, neste trabalho, serão apresentados os resultados das medições de todas as superfícies acima demonstradas (Fig. 3-3, Fig. 3-4, Fig. 3-5) e respectivas análises e conclusão dos resultados obtidos.

### 3.2 Caracterização das Superfícies Selectivas

Como foi dito anteriormente, o comportamento óptico das superfícies selectivas deve obedecer a critérios de emissividade e absortividade em diferentes regiões do espectro que se aproximem o mais possível do comportamento ideal. Assim, é necessário recorrer a métodos que possibilitem a quantificação do desempenho das superfícies em estudo. Neste trabalho foi desenvolvido um sistema de medição da emissividade térmica que seguidamente se descreve. Foram também feitas medidas de absortividade e reflectividade das superfícies obtidas em função do comprimento de onda utilizando um equipamento disponível no Laboratório de Aplicações Fotovoltaicas e Semicondutores.

#### Medição da Emissividade Térmica das Superfícies

A emissividade de uma superfície é, como anteriormente foi referido, um parâmetro importante para a caracterização de absorsores solares para sistemas solares térmicos. Para aplicações do tipo colector plano, geralmente utilizados a baixa temperatura ( $50^{\circ}\text{C} - 100^{\circ}\text{C}$ ), a emissividade pode ser calculada a partir de dados de reflectância espectral na banda correspondente aos  $2,5 - 50\mu\text{m}$  (Santelices, 1991).

Este tipo de medida pode ser obtida utilizando um espectrofotómetro de infravermelho equipado com um acessório para medição de reflectâncias como, por exemplo, uma esfera integradora. Uma vez que este tipo de equipamento é dispendioso e não estará, em geral, acessível no contexto da autoconstrução de colectores solares térmicos, é relevante desenvolver uma solução alternativa de baixo custo para efectuar esta medição. Neste contexto, a determinação da emissividade de superfícies pode ser efectuada, como proposto por Santelices (Santelices, 1991), utilizando um sensor piroeléctrico para detectar directamente o integral da energia emitida pela superfície em toda a região dos infravermelhos.

O sistema de medição de emissividade térmica de superfícies desenvolvido neste trabalho apresenta-se na figura 3-6. Em termos gerais, o sistema é composto por:

- um banho termostatado (1) e respectivo controlador de temperatura (4); este componente é constituído por um depósito onde é colocada água, que além da resistência de aquecimento, contém uma bomba de circulação que permite fazer circular a água para o exterior através das mangueiras visíveis na imagem;
- um sistema de detecção de radiação infravermelha (2), e a respectiva fonte de alimentação (3), desenvolvido no âmbito do corrente trabalho, que adiante se descreverá;
- um termómetro digital (5) e o respectivo termopar tipo K;
- um multímetro digital (6) para medição do sinal de saída do sistema de detecção, como adiante se descreverá;
- um conjunto de placas de cobre (7) para calibração do sistema de detecção



Fig. 3-6 - Montagem experimental para medição da emissividade de superfícies: 1 – banho termostático; 2 – sistema de medição da radiação emitida pela superfície; 3 – fonte de alimentação do sistema de medição; 4 – controlador de temperatura do banho termostático; 5 – termómetro; 6 – multímetro; 7 – placas de cobre utilizadas para calibração e ensaio do sistema.

Em utilização normal, a água do banho termostático à temperatura desejada, é circulada através de mangueiras, por um tubo de cobre soldado na parte traseira de uma chapa de cobre com 1,5mm de espessura utilizada como suporte para as superfícies em estudo (figura 3-7, 3), elas próprias constituídas por placas de cobre com 1mm de espessura, sobre as quais foi efectuado o depósito da camada emissora selectiva em estudo. Na superfície da chapa de cobre utilizada como suporte para as amostras é colocada uma gordura com boa condutividade térmica por forma a assegurar um bom acoplamento térmico com as amostras (neste caso a gordura utilizada foi “Apiezon M Grease” com uma condutividade térmica de 0,194 W/m °C a uma temperatura de 20°C).

Mesmo para a velocidade máxima de circulação de água permitida pelo sistema, foi detectada uma diferença de temperatura significativa entre a temperatura do suporte e a do interior do banho termostático, tendo-se optado por soldar no suporte um pequeno bloco de cobre com um orifício para inserção do termopar que permite efectuar directamente a medição da sua temperatura. Com este sistema é possível estudar a emissão térmica das amostras desde a temperatura ambiente até temperaturas da ordem dos 90°C.

Como anteriormente se referiu, o sistema de medição da emissividade propriamente dito, foi desenvolvido no âmbito deste trabalho com base num detector piroeléctrico. Seguidamente serão descritos o princípio de funcionamento destes detectores, o tipo de condicionador de sinal que foi desenvolvido, e o procedimento adoptado para a calibração do sistema.



Fig. 3-7 – Pormenor da ligação do banho termostático ao suporte das amostras: (1) depósito de água com bomba de circulação no interior; (2) controlador de temperatura do banho; (3) chapa de cobre para suporte das amostras.

O elemento sensor de um detector piroeléctrico é feito utilizando um material ferroeléctrico como, por exemplo, o TGS (sulfato de triglicina) ou o Tantalato de Lítio ( $\text{LiTaO}_3$ ). Abaixo de uma temperatura crítica, conhecida por temperatura de Curie, verifica-se a existência neste tipo de materiais de uma grande polarização eléctrica espontânea. Se a temperatura a que o material se encontra for alterada, por exemplo, em consequência da absorção de radiação incidente, este estado de polarização sofrerá uma alteração, o que originará uma redistribuição de cargas eléctricas no material. Um elemento sensor piroeléctrico é no fundo um condensador cujo dieléctrico é formado por uma fina camada de material ferroeléctrico, sobre a qual se depositam eléctrodos metálicos em faces opostas. Sempre que ocorrer uma variação de temperatura do material ferroeléctrico que constitui o dieléctrico deste condensador a redistribuição de carga anteriormente mencionada dará origem a uma diferença de potencial entre os seus terminais. Naturalmente, a detecção desta diferença de potencial só será possível utilizando um sistema de medida com uma impedância de entrada elevada comparativamente com a impedância do sensor.

Uma vez que o processo de detecção é puramente térmico, a resposta deste tipo de detector é independente do comprimento de onda da radiação incidente. Na prática, é possível construir detectores para funcionamento em bandas específicas do espectro electromagnético simplesmente utilizando janelas no encapsulamento do sensor que apresentem bandas de transmissão nessas mesmas bandas.



Fig. 3-8 – Componentes exteriores da caixa de medição de emissividades: (1) suporte para as amostra; (2) Talhador mecânico; (3) Motor eléctrico DC para rotação do talhador.

Na figura 3-8 apresenta-se uma fotografia do sistema de detecção desenvolvido. As placas absorptoras em estudo, com  $60 \times 60 \text{ mm}^2$ , são montadas no suporte anteriormente descrito (1), sendo o conjunto encaixado nos rasgos de duas abas do suporte construídas em teflon, de modo a ser possível manter as mesmas condições de medida para todas as amostras, em particular, garantindo sempre a mesma distância entre a placa e o elemento sensor. Foi utilizado o teflon para este fim uma vez que se trata de um material que resiste bem às temperaturas utilizadas neste trabalho sem que ocorra a sua degradação.

O sensor utilizado foi o sensor piroeléctrico LHi807 da *Perkin Elmer Optoelectronics*. Este sensor tem uma sensibilidade típica de  $640 \text{ V/W}$  na banda dos infravermelhos (quando se encontra em funcionamento com uma frequência de obturação de  $10 \text{ Hz}$ ), uma impedância de saída da ordem dos  $10 \text{ k}\Omega$ , e uma abertura angular da ordem dos  $130^\circ$ . Esta abertura angular foi propositadamente reduzida, alojando o sensor no fundo de um suporte cilíndrico projectado de forma a restringir o “ângulo de visão” do sensor à placa em estudo. A distância entre o suporte das amostras e o sensor é ajustável pelo utilizador, deslocando o suporte relativamente à superfície frontal da caixa, na qual se encontra enroscada a peça de fixação do sensor. Evita-se assim a detecção de energia radiante proveniente de outras fontes que não a superfície em estudo.

Uma vez que o tipo de sensor utilizado apenas responde a variações da energia recebida, o sistema de medida utiliza um talhador (*chopper*) mecânico constituído por um disco em PVC (2), no qual foram abertos dois rasgos. Estes rasgos foram feitos de modo a que, por cada rotação completa do disco, o sensor (fixo no interior da peça cilíndrica visível na imagem através do rasgo inferior do talhador), seja duas vezes exposto à radiação emitida pela amostra (colocada no suporte 1), em cada uma delas durante um tempo correspondente a cerca de  $\frac{1}{4}$  do período de rotação do talhador. A rotação do talhador é feita utilizando um motor DC (3) que lhe está acoplado por uma junta tórica de borracha.

A frequência de obturação do sensor obtida com este sistema é medida por um par emissor/detector de infravermelhos do tipo reflectivo, instalado na tampa da caixa imediatamente por detrás do talhador (não visível na imagem), numa posição que garante que a radiação utilizada neste processo não seja

nunca interceptada pelo detector piroeléctrico. Em funcionamento normal, a frequência de obturação utilizada é da ordem dos 10Hz.

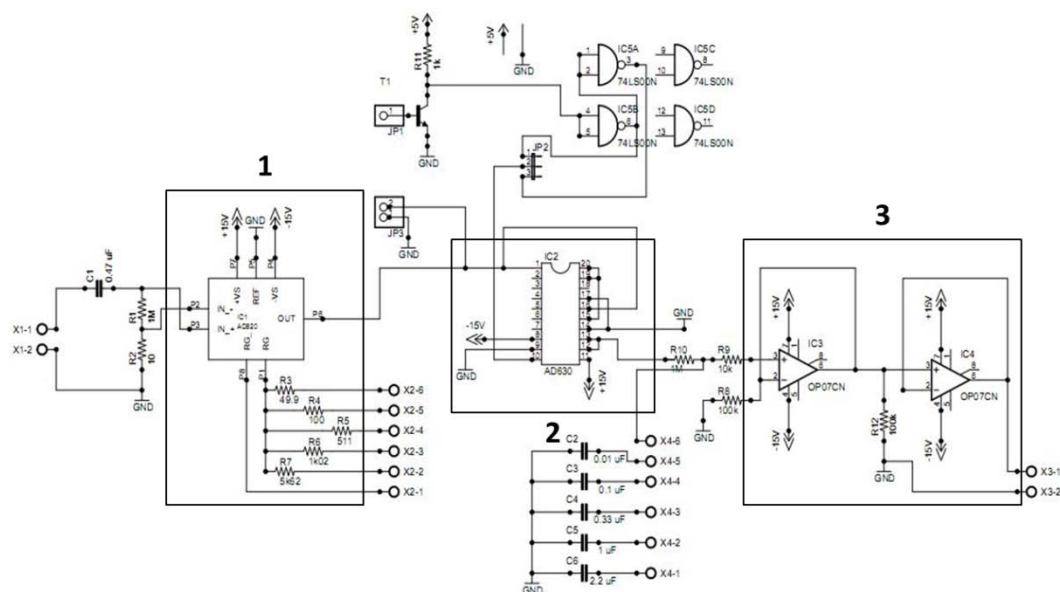


Fig. 3-9 Esquemático do condicionador de sinal implementado para utilização com o detector piroeléctrico.

Na figura 3-8 representa-se esquematicamente o condicionador de sinal desenvolvido, um sistema de detecção síncrona (*lock-in*) de baixo custo (Sengupta, Farnham, & Whitten, 2005). O sinal proveniente do sensor é introduzido através do ligador X1 num pré-amplificador diferencial de tensão baseado no amplificador de instrumentação AD620, cujo ganho é controlado através da ligação de uma resistência (do grupo R<sub>3</sub>-R<sub>7</sub>) entre os terminais 1 e 8. Em utilização normal, o ganho utilizado neste pré-amplificador foi de  $\times 50$ . A saída do pré-amplificador é ligada a um circuito detector de fase baseado no modulador de precisão AD630. O sinal proveniente do par emissor/detector que detecta a frequência do talhador é introduzida no circuito através do ligador JP1, sendo ligado a uma porta não-E cuja saída (directa ou negada) é utilizada como sinal de sincronismo para o modulador AD630. A saída do modulador é filtrada por um filtro passa-baixo cuja frequência de corte é escolhida pelo utilizador seleccionando qual dos condensadores C<sub>2</sub>-C<sub>7</sub> é introduzido no circuito. Finalmente, a saída do modulador é introduzida num amplificador de tensão ( $\times 1$  ou  $\times 10$ ). O valor RMS da tensão alterna de saída deste amplificador síncrono, proporcional à variação provocada na temperatura do sensor pela radiação infravermelha nele incidente, é medido utilizando um voltímetro.

Na figura 3-10 apresenta-se um pormenor do interior da caixa apresentada na figura 3-6. É visível a peça de fixação do sensor anteriormente referida e a placa de circuito impresso que implementa o esquemático apresentado na figura 3-7. A diminuição do ângulo de abertura detectado pelo sensor imposta pela opção de o fixar utilizando um colimador de forma cilíndrica revelou-se eficiente, no sentido em que é possível, através do ajuste da distância entre o suporte das amostras e o sensor, tornar o sistema completamente insensível a radiação que não seja proveniente das amostras em estudo. Este



facto torna possível a utilização do dispositivo em ambientes onde se verifique a existência de outras fontes importantes de radiação térmica.<sup>11</sup>

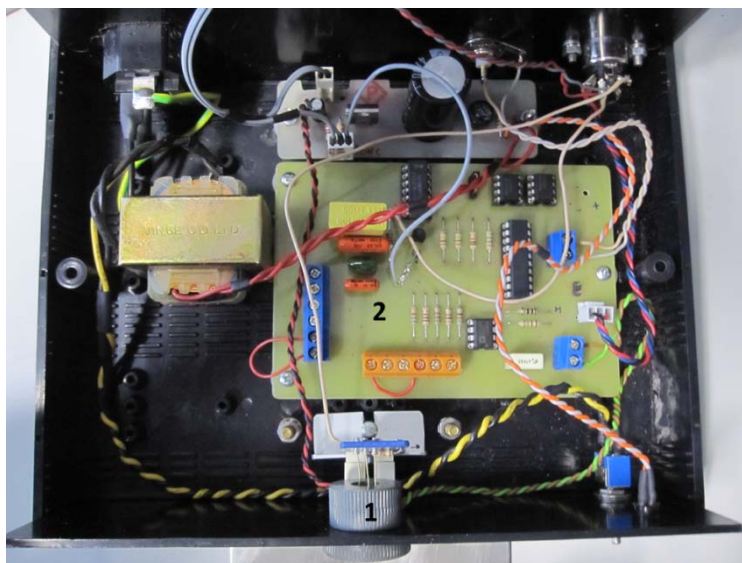


Fig. 3-9 – Detalhe do sistema de medição das emissividades: 1 – colimador cilíndrico utilizado para fixação do sensor piroelétrico ao painel frontal da caixa; 2 – circuito impresso do amplificador síncrono.

A calibração do sistema foi efectuada utilizando várias superfícies com diferentes valores de emissividade. As diferentes superfícies (Figura 3-10) foram construídas utilizando chapas de cobre nu, (com uma emissividade de 0,1) cobertas, em diferentes proporções, por tinta preta (com uma emissividade de 0.95):

- 100% de Cobre;
- 75% de Cobre e 25% de Tinta Preta;
- 50% de Cobre e 50% de Tinta Preta;
- 25% de Cobre e 75% de Tinta Preta;
- 100% de Tinta Preta.

---

<sup>11</sup> De facto, este sistema já foi utilizado com grande sucesso nas aulas práticas da disciplina de Termodinâmica, tendo funcionado sem qualquer tipo de problema em ambiente normal de sala de aula.

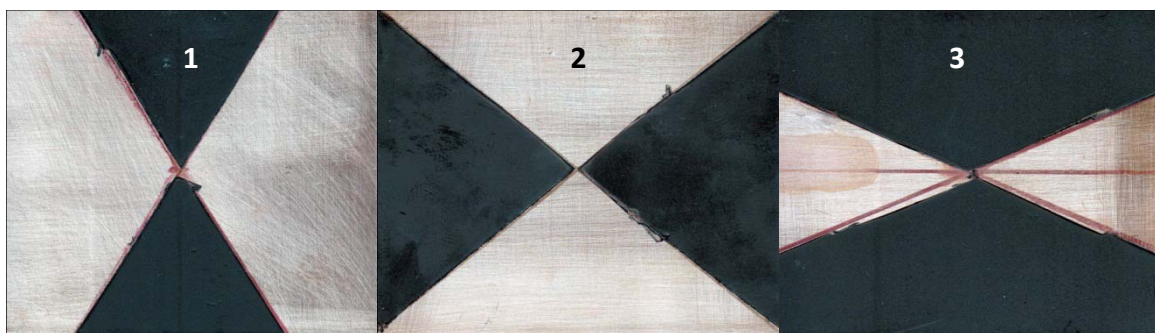


Fig. 3-10 – Superfícies utilizadas para a calibração do sistema: 75% de Cobre e 25% de Preto (1), 50% de Cobre e 50% de Preto (2), 25% de Cobre e 75% de Preto (3).

Para cada uma destas placas fizeram-se medições da tensão de saída do sistema para temperaturas em intervalos de 5°C, começando as medições em valores de temperatura na ordem dos 25°C e terminando a uma temperatura da ordem dos 95°C.

Na figura 3-14 apresenta-se o conjunto de resultados obtidos, representando a tensão de saída  $V_{RMS}$  do sistema em função da quarta potência da sua temperatura absoluta, para cada uma das placas. De uma forma geral, verifica-se a existência de um bom acordo com o comportamento esperado, traduzido pela relação expressa na equação (6).

$$V_{RMS} = a_0 + a_1 T_{superfície}^4 \quad (7)$$

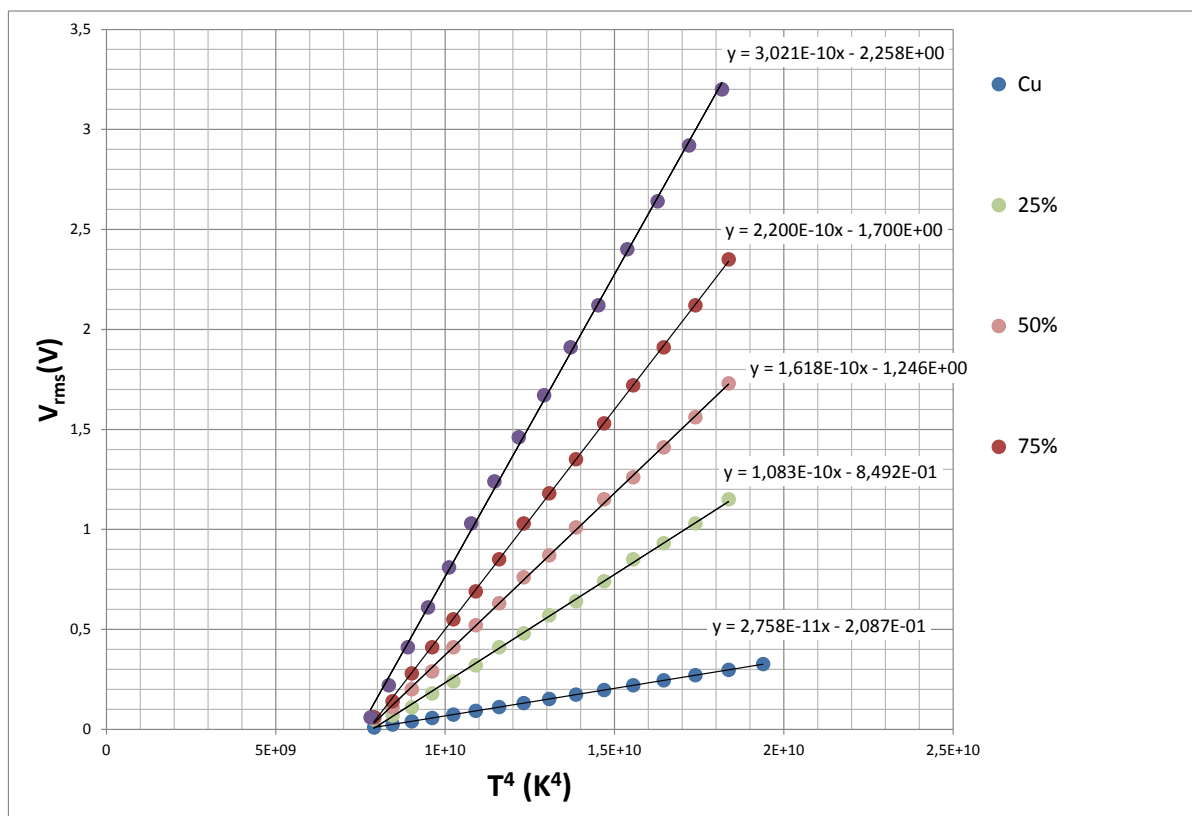


Fig. 3-11 – Curvas obtidas nas medições das superfícies utilizadas para calibração do sistema.



Na figura representam-se ainda as linhas de tendência correspondentes ao ajuste linear efectuado pelo método dos mínimos quadrados aos diferentes conjunto de resultados, cujos parâmetros se encontram na tabela 3-1.

Tabela 3-1 – Resultados obtidos para os parâmetros de ajuste linear representados na figura 3-14.

Placa	$a_0 / V$	$a_1 / VK^{-4}$
100% Cobre	-0,2087	$2,758 \times 10^{-11}$
75% de Cobre e 25% de Preto	-0,8492	$1,083 \times 10^{-10}$
50% de Cobre e 50% de Preto	-1,2460	$1,618 \times 10^{-10}$
25% de Cobre e 75% de Preto	-1,7000	$2,200 \times 10^{-10}$
100% Preto	-2,2580	$3,021 \times 10^{-10}$

As diferentes ordenadas na origem  $a_0$  obtidas para as diferentes amostras traduzem o facto de, seja qual for a emissividade da amostra em estudo, o sinal de saída ser sempre nulo à temperatura ambiente, temperatura à qual se encontra o sensor, o que implica que todas as curvas se têm que cruzar necessariamente nesse ponto.

Com base neste conjunto de parâmetros foi interpolado o valor da tensão de saída do sistema de medida para cada uma das placas a uma temperatura padrão de 80°C. Estes valores apresentam-se na tabela 3-2. Nesta tabela apresentam-se ainda as emissividades previstas para essas superfícies, atendendo à percentagem que cada uma delas tem pintada de negro.

Tabela 3-2 – Valores calculados de emissividade das superfícies considerando a percentagem de cobertura com tinta negra, e valores de tensão registada pelo sistema de medida interpolados para uma temperatura padrão de 80°C.

Tipos de Placas	Emissividade	$V_{calc}(V)$
100% Cobre	0,10	0,2070
75% de Cobre e 25% de Preto	0,31	0,8353
50% de Cobre e 50% de Preto	0,53	1,2710
25% de Cobre e 75% de Preto	0,74	1,7220
100% Preto	0,95	2,4410

Com este conjunto de resultados é possível traçar a curva de calibração do sistema de medida de emissividades de superfícies, que se apresenta na figura 3-12. A barra de erro associada a cada um dos pontos experimentais foi tomada como sendo da ordem de 10%, tendo em atenção a reprodutibilidade observada durante as medições efectuadas. A curva de calibração utilizada corresponde ao ajuste linear representado no gráfico. Salienta-se que, embora o conjunto de pontos experimentais sugira em primeira análise a utilização de um ajuste quadrático, sobretudo tendo em atenção a colocação do último ponto experimental, a opção pelo ajuste do tipo linear se justifica pelo facto de a utilização de

um ajuste do tipo quadrático fazer com que a curva ajustada não passe pelas barras de erro de todos os pontos experimentais.

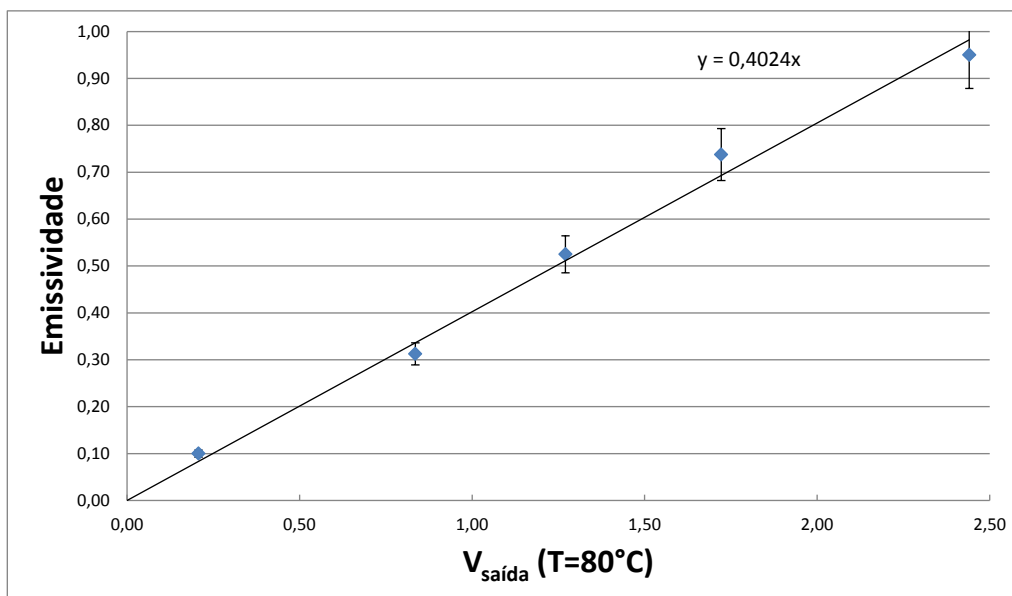


Fig. 3-12–Gráfico de emissividade em função da tensão para uma temperatura de 80°C.

A partir do gráfico da Fig. 3-12 torna-se possível determinar a emissividade térmica de qualquer superfície, bastando para isso medir a tensão de saída à temperatura de 80°C recorrendo ao esquema de medição atrás referido. O teste desta metodologia foi efectuada utilizando uma placa totalmente pintada com tinta branca.

As superfícies de cor branca têm uma emissividade que tipicamente se situa entre os 0,90 e os 0,95. De seguida serão mostrados os resultados das medidas de emissividade à placa branca através de um gráfico semelhante ao da Fig. 3-11 em que se mostram os valores de tensão à saída do sistema de medida (V) em função da quarta potência da temperatura absoluta (K).

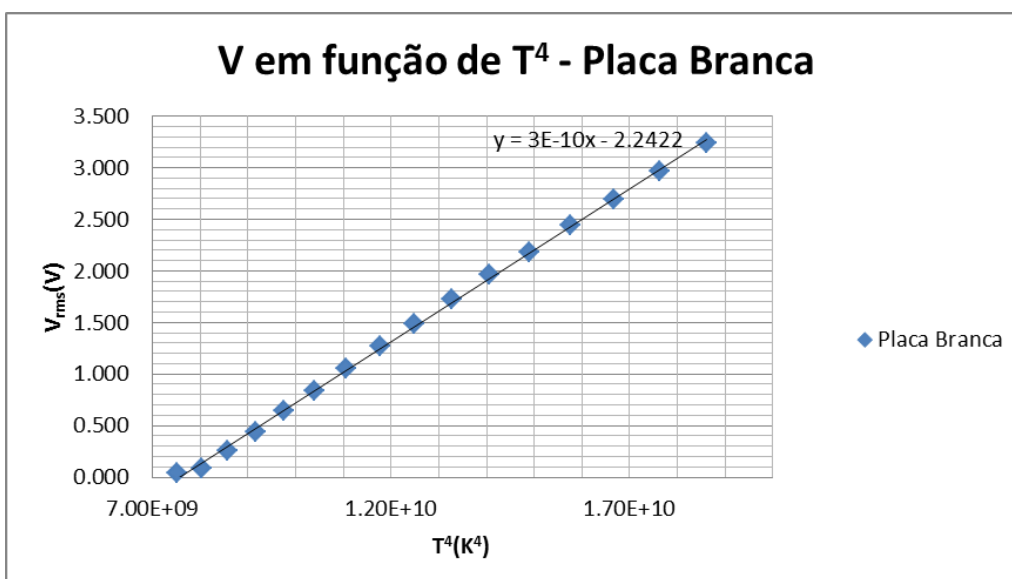


Fig. 3-13 – Curva de medição  $V_{RMS}(V)$  em função de  $T^4(K^4)$  de uma placa branca

A partir da curva representada na figura anterior, como foi dito anteriormente, torna-se possível obter o valor de emissividade para uma chapa de cobre revestida com uma tinta branca para uma temperatura previamente estabelecida de 80° C.

Assim, seguindo os passos anteriormente referidos, começa-se por se obter os valores dos parâmetros para o ajuste linear da linha de tendência a partir da equação desta representada na Fig. 3-13 ( $a_0$  corresponde à ordenada na origem e  $a_1$  corresponde ao declive da recta). A partir destes valores e utilizando a temperatura de 80° C obtém-se a tensão de saída correspondente a esta temperatura para a placa branca que será 2,37 V.

Utilizando o gráfico da Fig. 3-12, nomeadamente o declive da recta nele representada, poderá, então, determinar-se o valor de emissividade para a placa em questão: 0,95.

Este valor corresponde ao esperado para uma placa com um revestimento branco, o que permite concluir que o método adoptado para medição das emissividades de superfícies é apropriado.

### Resultados Obtidos

Após obtenção das superfícies selectivas e desenvolvimento do sistema de medição de emissividades procedeu-se à caracterização das superfícies utilizando este sistema. Como foi acima referido obtiveram-se superfícies variando os tempos de deposição e a corrente aplicada. As superfícies resultantes destas deposições são apresentadas nas Fig. 3-3, Fig. 3-4 e Fig. 3-5.

Nas tabelas seguintes apresentam-se os valores de emissividade obtidos para as diferentes superfícies.

Tabela 3-3 – Valores de emissividade para deposições com  $i=2 \text{ mA/cm}^2$

	Tempo de deposição (minutos)	$V_{\text{saída}} (80^\circ\text{C})$	Emissividade
$i=2 \text{ mA/cm}^2$	0,5	0,17	0,07
	1	0,22	0,09
	1,5	0,27	0,11
	2	0,22	0,09
	2,5	0,29	0,11
	3	0,44	0,17
	3,5	0,27	0,11
	4	0,29	0,11

Na Tabela 3-3 estão representados os valores obtidos para as emissividades das superfícies obtidas por electrodeposição com aplicação de uma densidade de corrente de  $2 \text{ mA/cm}^2$ , com tempos de deposição compreendidos entre 30 segundos e 4 minutos. Analisando os resultados obtidos verifica-se que as superfícies com tempos de deposição inferiores a 2 minutos são as que apresentam melhores valores de emissividade. No entanto, isto não significa que todas possuam bons comportamentos selectivos, uma vez que será necessária a medição das suas propriedades absorptoras na região do espectro solar para determinar com certeza a capacidade selectiva das superfícies. Tendo em conta os resultados

obtidos e o aspecto das placas após a execução das deposições, poderá considerar-se que a superfície com melhor comportamento selectivo deverá ser a que foi sujeita a 2 minutos de deposição, isto porque apresenta um aspecto mais homogéneo de todo o conjunto de superfícies apresentado na Tabela 3-3 unindo-se a esse facto o baixo valor de emissividade obtido para esta superfície.

De seguida (Tabela 3-4) são apresentados os resultados das medições efectuadas às superfícies representadas na Fig. 3-4. Estas superfícies foram obtidas aplicando uma densidade de corrente correspondente ao dobro da que foi aplicada nas superfícies da Fig. 3-3.

Tabela 3-4 - Valores de emissividade para deposições com  $i=4 \text{ mA/cm}^2$

	Tempo de deposição (minutos)	$V_{\text{saída}} (80^\circ\text{C})$	Emissividade
$i=4 \text{ mA/cm}^2$	0,5	0,24	0,10
	1	0,28	0,11
	1,5	0,19	0,08
	2	0,25	0,10
	2,5	0,30	0,12
	3	0,34	0,13
	3,5	0,42	0,17
	4	0,29	0,11

Tendo exclusivamente em atenção a quantidade de massa depositada seria de esperar que no caso em que foi aplicada uma densidade de corrente de  $4 \text{ mA/cm}^2$  se obtivessem superfícies com valores semelhantes de emissividade em relação a algumas das superfícies obtidas para uma densidade de corrente de  $2 \text{ mA/cm}^2$ , nomeadamente, esperava-se que as primeiras quatro superfícies correspondentes aos primeiros quatro intervalos de tempo representados na Tabela 3-4 correspondessem em aspecto, e em valores de emissividade, às superfícies sujeitas a uma densidade de corrente de  $2 \text{ mA/cm}^2$  com intervalos de tempo de execução da electrodeposição de 1, 2, 3 e 4 minutos. No entanto, tal não aconteceu, uma vez que, como foi anteriormente referido, os dois processos de deposição comparados para os tempos referidos apenas equivalem na quantidade de massa depositada; as propriedades do depósito tais como a sua distribuição na chapa de cobre e consequentemente as suas características emissivas podem ser diferentes devido a uma diferente diferença de potencial entre os dois processos em questão.

Tabela 3-5 – Valores de emissividade para deposições com  $i=4 \text{ mA/cm}^2$  e metade dos tempos de deposição

	Tempo de deposição (minutos)	$V_{\text{saída}} (80^\circ\text{C})$	Emissividade
$i=4 \text{ mA/cm}^2$	0,25	0,26	0,103
	0,5	0,23	0,091
	0,75	0,41	0,162
	1	0,22	0,087
	1,25	0,24	0,095

	Tempo de deposição (minutos)	V <sub>saída</sub> (80°C)	Emissividade
	1,5	0,27	0,106
	1,75	0,38	0,149
	2	0,29	0,114

Na tabela acima são apresentados os valores de emissividade referentes às superfícies representadas na Fig. 3-5, que foram sujeitas a uma densidade de corrente de 4 mA/cm<sup>2</sup>, no entanto relativamente às superfícies da Fig. 3-4 tiveram um tempo de electrodeposição com duração diferente, reduziu-se este tempo para metade e com intervalos de medição de 15 segundos

Os valores apresentados na Tabela 3-5 e mais uma vez recordando a teoria electroquímica (a matéria depositada é proporcional à densidade de corrente aplicada e ao tempo de duração da electrodeposição), deveriam ter sido obtidos valores em tudo semelhantes aos apresentados na Tabela 3-3. No entanto está-se a lidar com diferentes diferenças de potencial no decorrer das deposições o que implicará que a forma como o material é depositado no substrato seja diferente entre estes dois processos de deposição. Ainda assim obtiveram-se valores razoáveis de emissividades sendo que o valor mais alto obtido foi de 0,18, que poderá ser perfeitamente aceitável para uma superfície selectiva, apesar de ser preferível utilizar superfícies com emissividades mais baixas. No entanto é essencial realizar medidas de reflectividade e absortividade das superfícies de modo a perceber com maiores certezas a capacidade selectiva das superfícies em estudo.

### Método de Medição de Reflectividades

O sistema de medida de reflectividade utilizado no âmbito desta dissertação recorre a uma esfera integradora. O modelo de funcionamento da esfera integradora tem origem na lei do co-seno de Lambert, que diz que para a energia radiativa emitida por uma superfície plana, a intensidade dessa energia varia com o co-seno do ângulo entre o ponto de vista do observador e a normal da superfície. Esta relação é apenas válida para superfícies lambertianas<sup>12</sup>. Esta lei foi proposta pelo físico e matemático suíço Johann Heinrich Lambert aquando da publicação do seu livro *Photometria* em 1760 (Cowan, 2007).

Uma esfera integradora trata-se de uma esfera fechada com algumas aberturas que servirão como entrada da radiação, colocação da amostra e colocação do sensor. O interior da esfera é composto por uma superfície que teoricamente deveria reflectir 100% da luz incidente de maneira uniforme e idealmente difusa (superfície lambertiana). A área total das aberturas deve ser o mais baixa possível, não devendo ultrapassar os 5% da área total da esfera.

<sup>12</sup>Superfícies que reflectem a luz que nelas incide em todas as direcções, também designadas por reflectores difusos. A sua radiância é independente do ângulo do ponto de vista do observador sob qualquer condição de iluminação. São superfícies baças por oposição aos reflectores polidos que reflectem a luz incidente numa só direcção, por exemplo os espelhos ou materiais brilhantes

O princípio de funcionamento do sistema utilizado nesta dissertação consiste em emitir um feixe luminoso num dado comprimento de onda através de uma fibra óptica em direcção à amostra da qual se pretende obter a reflectividade para esse comprimento de onda.

De seguida serão enumerados os passos que envolvem a obtenção da reflectividade das superfícies através de um diagrama de blocos.

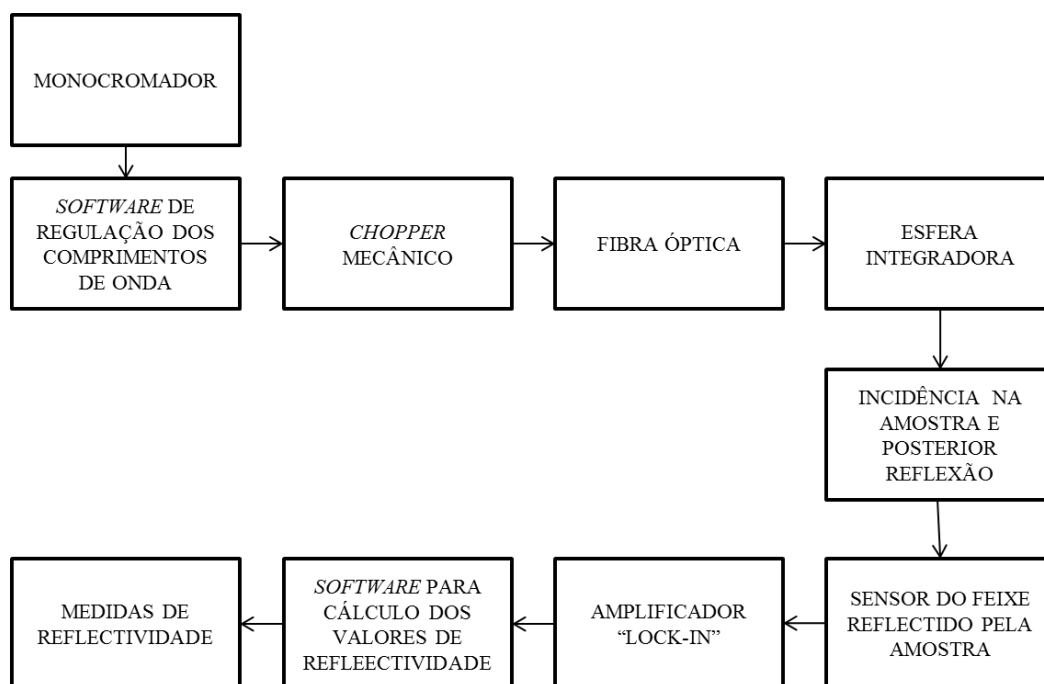


Fig. 3-14 – Diagrama de blocos para enumeração dos passos envolvidos na medição de reflectividades das superfícies

O aparelho que regula a radiação transmitida para a amostra designa-se por monocromador<sup>13</sup>. A luz que chega, pela fibra óptica, à amostra tem origem numa lâmpada da qual se pode regular a intensidade luminosa.

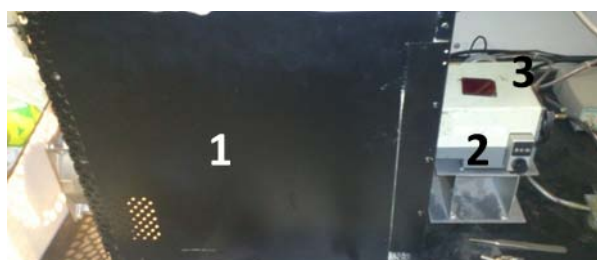


Fig. 3-15 - Pormenor do monocromador: (1) caixa com lâmpada e lentes; (2) sistema de controlo dos comprimentos de onda e ligação à fibra óptica e (3) filtro vermelho

Na Fig. 3-15 são mostrados os componentes onde tem origem a radiação que será transportada pela fibra óptica e o mecanismo de controlo dos comprimentos de onda com que essa radiação chegará à amostra. No número (1) da Fig. 3-15 está representada a caixa que contém a lâmpada que irá gerar a

<sup>13</sup> Tem a função de restringir uma radiação com vários comprimentos de onda a um feixe com um comprimento de onda específico que chegará à amostra. Para isso são utilizados elementos de dispersão que fazem com que esta restrição aconteça.

luz, esta luz deve ser concentrada por forma a atingir o ponto de entrada no sistema de regulação de comprimentos de onda, esta regulação é feita a partir da colocação de duas lentes concentradoras à frente da lâmpada. Após esta fase a radiação é filtrada pelo sistema de regulação de comprimentos de onda (2) o que permite que a amostra apenas receba a quantidade de radiação pretendida e anteriormente estabelecida no *software* utilizado em conjunto com este sistema. O filtro vermelho (3) é utilizado para radiações com comprimentos de onda maiores do 800 nm, isto para garantir que a radiação tem realmente esses valores de comprimentos de onda quando chega à amostra.

A luz proveniente da lâmpada atravessa vários espelhos de modo a ser decomposta no comprimento de onda desejado.

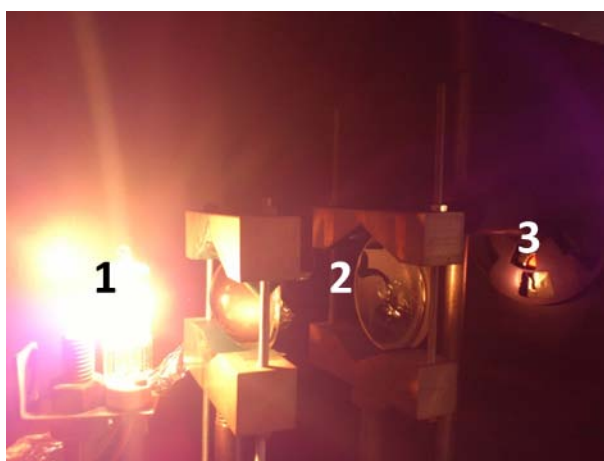


Fig. 3-16 - Pormenor do interior da caixa: (1) fonte de luz do sistema; (2) lentes concentradoras de radiação; (3) talhador mecânico e orifício de entrada de radiação no regulador de comprimento de onda.

Na imagem anterior são mostrados em pormenor o interior da caixa onde se inserem a lâmpada e as lentes que irão formar o feixe luminoso transmitido pela fibra óptica e também o talhador mecânico que serve como modulador de sinal, como foi anteriormente referido.

No sistema utilizado a regulação dos comprimentos de onda para os quais serão feitas as medidas é feita automaticamente sendo que tem um mecanismo associado ao *software* de medição que altera o feixe de radiação para o comprimento de onda pretendido, bastando para isso no computador escolher os valores de radiação para os quais se quer obter medidas. Antes de chegar à fibra, o feixe luminoso é modulado recorrendo a um talhador mecânico o que possibilita que o amplificador “*lock-in*” receba um sinal modulado necessário para o seu funcionamento. Durante a obtenção das medidas é necessário colocar um filtro de infravermelhos quando se atingem os comprimentos de onda que compõem esta parte do espectro (a partir dos 800 nm), o que permite obter melhores comportamentos do sistema garantindo que a radiação que chega à amostra apenas tenha valores de comprimentos de onda correspondentes aos infravermelhos. De seguida é mostrada a parte do sistema de medida onde são regulados os valores de comprimento de onda da radiação que chega á amostra.

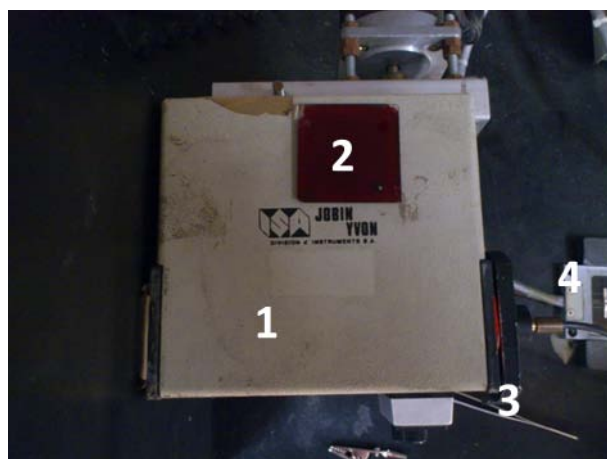


Fig. 3-17 - Pormenor do sistema regulador dos comprimentos de onda: (1) caixa onde a luz é filtrada; (2) filtro vermelho; (3) ranhura de inserção do filtro vermelho; (4) cabo de fibra óptica

Após este processo o feixe emitido chegará à esfera integradora onde será incidido directamente na amostra da qual se pretende obter a reflectividade espectral. Esta amostra irá posteriormente reflectir a radiação incidente em várias direcções, sendo que a radiação resultante das várias reflexões no interior da esfera irá chegar a um detector que transmite um sinal que será sujeito a uma limpeza de ruído através de um amplificador “*lock-in*” de modo a obter-se um sinal limpo que permita obter uma leitura de reflectividade da superfície.

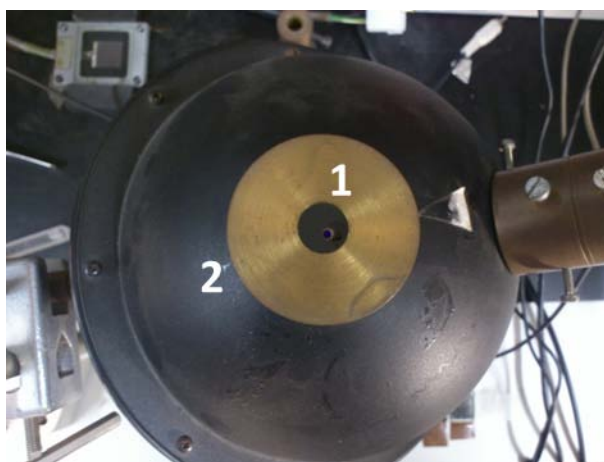


Fig. 3-18 - Vista pormenorizada da esfera integradora: (1) porta amostras e (2) esfera integradora.

Na Fig. 3-18 pode ver-se uma vista pormenorizada da esfera integradora, sendo que é possível ver a fibra óptica que transporta a radiação que irá incidir na amostra da qual se pretende obter as medidas de reflectividade. O detector da radiação reflectida pela amostra encontra-se debaixo da fibra óptica, o que permite que a radiação que nele incide não venha directamente da amostra, sendo obrigada a reflectir mais do que uma vez nas paredes da esfera o que permite que ao detector apenas chegue a radiação que interessa.

Associado a este sistema está um *software* que simplifica a obtenção de resultados. O funcionamento deste *software* é simples: o computador onde corre o programa recebe dados do amplificador “*lock-in*” e utiliza estes dados para proceder à medição das reflectividades. Para medir espectralmente a



propriedade reflectiva das amostras é necessário compará-las com um material cujos valores de reflectividade sejam conhecidos, neste caso será utilizado como material de referência o alumínio.

Assim, o programa usa estas medidas da seguinte forma: coloca-se uma amostra de alumínio (ou outro material cuja reflectividade espectral seja conhecida) para ser medida utilizando comprimentos de onda que estejam contemplados num ficheiro com as suas reflectividades espectrais, o programa executa duas medidas por ponto fazendo uma média dos dois valores obtidos e obtém um sinal em *volts* para cada comprimento de onda escolhido, designando este sinal como “ $R_{ref\_medido}$ ”.

Posteriormente é colocada a amostra da qual se pretende obter valores de reflectividade no porta-amostras da esfera integradora e são obtidos valores também em volts para os mesmos comprimentos de onda que já tinham sido utilizados na medição da amostra de referência, a este sinal o programa dá o nome de “ $R_{si}$ ”.

Após a obtenção dos sinais espectrais do alumínio e da amostra o programa executa uma operação simples de modo a obter a reflectividade da amostra em que vai buscar ao ficheiro acima referido os valores de reflectividade do alumínio para cada comprimento de onda em que foram feitas as medidas designando-os por “ $R_{ref}$ ”, esse cálculo é o seguinte:

$$\left( \frac{R_{si}}{R_{ref\_medido}} \right) \times R_{ref} \quad (8)$$

A operação representada na equação (8) permite obter valores de reflectividade de qualquer superfície, bastando para isso fornecer ao *software* os valores das reflectividades de um material do qual estas sejam previamente conhecidas e que serão utilizadas como medidas de referência, executando uma simples relação matemática.

### Resultados da Medição

Na realização das medidas de reflectividade das superfícies obtidas, optou-se por não se sujeitar todas as chapas electrodepositadas a estas medições, isto apenas partindo da análise visual das superfícies que levou a considerar que aquelas com menor quantidade de material depositado seriam à partida excluídas dado que em princípio não teriam um bom comportamento como superfícies selectivas.

Assim as placas das quais não se obtiveram medidas de reflectividade foram: da Fig. 3-3 as superfícies (a) e (b); da Fig. 3-4 a superfície (a) e da Fig. 3-5 as superfícies (a) e (b), uma vez que claramente estas apresentam as menores quantidades de material depositado o que não iria ao encontro do que é utilizado como absorsor na industria solar térmica que são superfícies de cor escura o que indica grande capacidade de absorção de radiação solar.

Existiram alguns problemas associados à obtenção destas medidas: o limite de medição do sistema é limitado aos 1100 nm, sendo que quando se executaram medidas de teste ao sistema também se verificou que os valores de reflectividade obtidas numa gama de radiação abaixo dos 600 nm

apresentavam aberrações, assim optou-se por considerar os valores de medição das placas para intervalos de comprimentos de onda entre os 600 e os 1100nm. Os valores de reflectividade variam entre 0 e 1, no caso destes resultados obtidos os valores de reflectividade ultrapassavam largamente o limite de 1, por deficiência do sistema de medição, dado que é impossível haver valores de reflectividade superiores a 1. Seria desejável que as medições fossem feitas num intervalo mais abrangente de comprimentos de onda nomeadamente alargar as medidas até valores na ordem dos 10  $\mu\text{m}$ .

O método de medição é aplicável apenas a um ponto da amostra, não incluindo toda a área da amostra da qual foram medidas as suas propriedades emissivas. Se a amostra apresentar uma boa homogeneidade a extrapolação destes resultados de reflectividades poderá ser possível para a totalidade da superfície da amostra.

No gráfico seguinte são apresentados os valores de reflectividade obtidos para as superfícies representadas na Fig. 3-3, ou seja para as placas sujeitas a uma densidade de corrente de  $2 \text{ mA/cm}^2$  durante a sua electrodeposição.

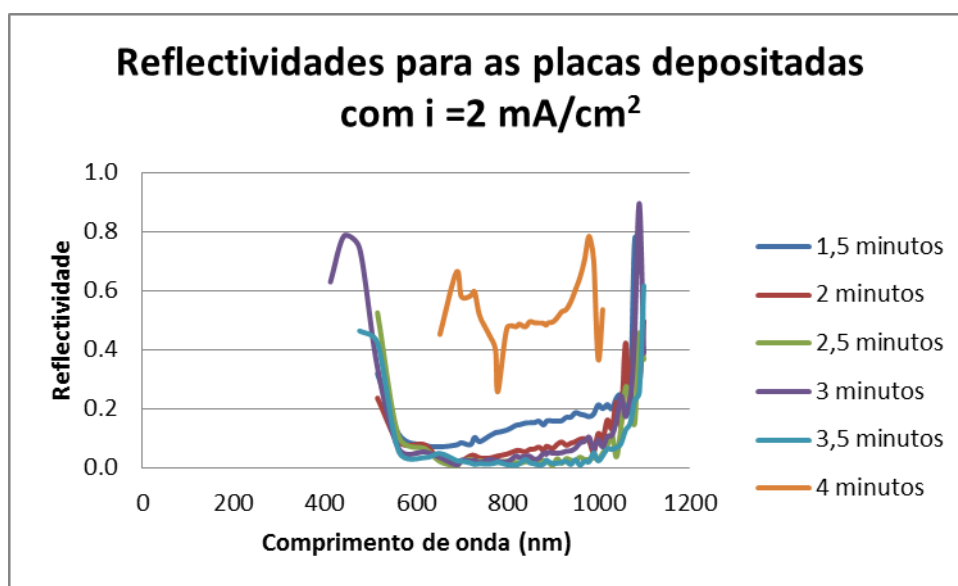


Fig. 3-19 – Gráfico das reflectividades para as placas depositadas com  $i = 2 \text{ mA/cm}^2$

Desde logo se exclui a superfície com tempo de deposição de 4 minutos dado que é notório que o comportamento reflectivo desta não se adequa ao desejado para uma superfície selectiva, bastando para isso comparar esta curva com a curva do comportamento selectivo ideal demonstrada na Fig. 3-1 (b).

Em relação às outras superfícies, todas apresentam um comportamento semelhante, sendo a que tem pior performance a superfície com 1,5 minutos de deposição. Mesmo considerando as deficiências do sistema poderão ser consideradas as superfícies medidas como sendo boas superfícies selectivas se for tido em conta a tendência que o comportamento das curvas de medição parece tomar a partir dos 1100 nm, sendo um comportamento próximo do desejável para uma superfície com comportamento espectralmente selectivo.

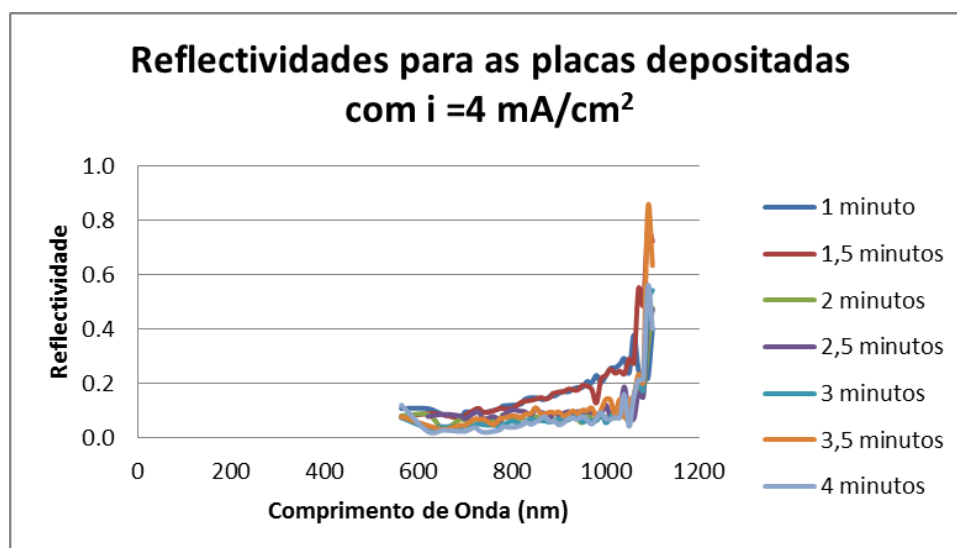
De seguida será apresentada uma tabela em que se mostram os valores de absorptividade espectral das superfícies consideradas no gráfico da Fig. 3-19 e também a sua selectividade. Estes valores serão obtidos tendo em conta as equações (7) e (8), sendo que para se obter os valores de absorptividade espectral foi feita uma média dos valores de reflectividade obtidos para cada comprimento de onda (Henninger, 1984). Os valores de emissividade são os que figuram na Tabela 3-3.

Tabela 3-6 – Tabela de absorptividade espectral, emissividade térmica e selectividade das superfícies depositadas com  $i=2 \text{ mA/cm}^2$

<b>Tempo de Deposição (m)</b>	<b>Absorptividade Espectral</b>	<b>Emissividade Térmica</b>	<b>Selectividade</b>
<b>1,5</b>	0,80	0,11	7,5
<b>2</b>	0,89	0,09	10,2
<b>2,5</b>	0,92	0,11	8,1
<b>3</b>	0,85	0,17	4,9
<b>3,5</b>	0,93	0,11	8,7
<b>4</b>	0,47	0,11	4,1

Na análise aos valores acima representados percebe-se claramente que a superfície com melhores características de selectividade é a que esteve sujeita a electrodeposição durante 2 minutos. Esta superfície apresenta um valor aceitável de absorptividade sendo que em termos de emissividade é a que tem melhor performance. No entanto as superfícies com 2,5 e 3,5 minutos de deposição também poderão desempenhar bem o papel de superfície selectiva dado que apresentam um valor de absorptividade espectral bastante bom. O facto de ser a superfície com 2 minutos de deposição com melhor valor de selectividade veio confirmar o que foi acima dito, na análise dos resultados da Tabela 3-3, em que se identificava esta superfície como sendo a que poderia apresentar melhor comportamento selectivo.

No gráfico abaixo (Fig. 3-20) são apresentadas as curvas de reflectividade espectral para as placas sujeitas a deposição com uma densidade de corrente de  $4 \text{ mA/cm}^2$ , representadas na Fig. 3-4.

Fig. 3-20 - Gráfico das reflectividades para as placas depositadas com  $i=144 \text{ mA}$ 

Pela observação do gráfico anterior poderão considerar-se todas as superfícies medidas como tendo comportamentos selectivos, sendo as superfícies com 1 e 1,5 minutos de deposição as que, à primeira vista, apresentam comportamentos menos satisfatórios, nomeadamente na zona entre os 800 nm e os 1000.

No entanto, para melhor se perceber o real valor destas superfícies em termos de performance selectiva, na tabela abaixo encontram-se os valores de absorptividade espectral e emissividade térmica de dada superfície e o cálculo da selectividade de cada uma delas.

Tabela 3-7 - Tabela de absorptividade espectral, emissividade térmica e selectividade das superfícies depositadas com  $i=4 \text{ mA/cm}^2$ 

<b>Tempo de Deposição (m)</b>	<b>Absorptividade Espectral</b>	<b>Emissividade Térmica</b>	<b>Selectividade</b>
<b>1</b>	0,80	0,11	7,2
<b>1,5</b>	0,78	0,08	10,4
<b>2</b>	0,91	0,10	9,2
<b>2,5</b>	0,89	0,12	7,5
<b>3</b>	0,90	0,13	6,7
<b>3,5</b>	0,87	0,17	5,2
<b>4</b>	0,90	0,11	7,9

Pela análise da tabela acima (Tabela 3-7) vê-se que as superfícies com melhores valores de selectividade são as que se foram electrodepositadas durante 1,5 e 2 minutos, sendo que a de 1,5 minutos é a melhor desta série de superfícies. No entanto, a superfície que se crê ser a mais indicada para utilização num sistema solar térmico é a de 2 minutos de deposição, isto porque é a que apresenta um melhor valor de absortividade e um valor razoável de emissividade térmica o que poderá perspectivar um bom comportamento ao ser integrada num colector solar térmico.

Na Fig. 3-21 encontra-se o gráfico representativo das reflectividades espectrais para a última serie de superfícies obtidas neste trabalho, as placas apresentadas na Fig. 3-5, em que se executou a deposição com uma densidade de corrente de  $4 \text{ mA/cm}^2$  e com metade dos tempos de deposição, que variaram entre 15 segundos e 2 minutos.

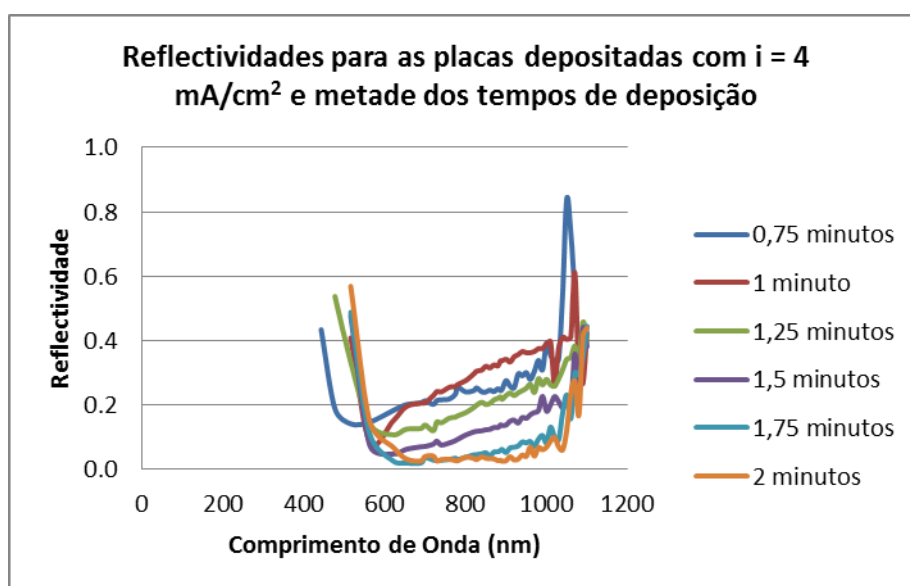


Fig. 3-21 - Gráfico das reflectividades para as placas depositadas com  $i=4 \text{ mA/cm}^2$  e metade dos tempos de deposição

De todas as séries de amostras medidas esta parece ser a que apresenta piores resultados. Neste caso são apenas duas as superfícies que apresentam uma curva próxima do desejado, são elas a de tempo de deposição de 1,75 minutos e 2 minutos. A tabela seguinte servirá para se poder determinar quais as superfícies que melhores condições terão para serem utilizadas num sistema solar térmico.

Tabela 3-8 - Tabela de absortividade espectral, emissividade térmica e selectividade das superfícies depositadas com  $i=144 \text{ mA}$  e metade dos tempos de deposição

Tempo de Deposição (m)	Absortividade Espectral	Emissividade Térmica	Selectividade
0,75	0,70	0,16	4,4
1	0,68	0,09	7,9
1,15	0,76	0,10	8,0

<b>1,5</b>	0,82	0,11	7,7
<b>1,75</b>	0,90	0,15	6,0
<b>2</b>	0,90	0,11	7,8

Pela leitura da tabela cima representada nota-se que os valores obtidos para a absorptividade espectral desta série de amostras não foram globalmente satisfatórios, sendo que as duas últimas amostras são as que apresentam resultados mais próximos do desejado.

As superfícies que apresentam melhores valores de absorptividade espectral são as de 1,75 e 2 minutos de deposição, no entanto apresentam valores de emissividade térmica algo elevados que farão com que as suas selectividades sejam relativamente baixas quando comparadas com superfícies das séries de medição anteriores. Quando esta comparação é feita, nota-se claramente que esta última série de medição foi a que apresentou piores comportamentos selectivos.

Após a execução destas medidas verificou-se que se obtiveram alguns bons valores de selectividade, conjugados com absorptividades espectrais que se poderão considerar aceitáveis, no entanto ainda longe de alguns valores observados na literatura que apontavam para absorptividades na ordem dos 0,95 (Santelices, 1991). Pode-se também concluir que o não é o facto de sujeitar as superfícies a uma maior taxa de deposição durante o processo de electrodeposição que vai fazer com que os seus desempenhos sejam melhores, dado que na generalidade a maiores taxas de deposição correspondem depósitos com menor qualidade, uma vez que, por exemplo, durante a deposição a existência de uma diferença de potencial mais elevada pode dar origem a outras reacções, sendo preferível aplicar correntes mais baixas para a obtenção de superfícies selectivas.

Na imagem seguinte foi feito um paralelismo em termos de reflectividade espectral entre a melhor superfície obtida (2 minutos de deposição e  $i=4 \text{ mA/cm}^2$ , Tabela 3-7) e um gráfico de reflectividade espectral contido na bibliografia base desta dissertação (Santelices, 1991). Desta forma é possível comparar o comportamento selectivo nas superfícies obtidas neste trabalho com outras já existentes. De referir que a curva (a) da Fig. 3-22 corresponde a uma superfície de *black nickel* com 2 minutos de deposição e densidade de corrente de  $2 \text{ mA/cm}^2$ .

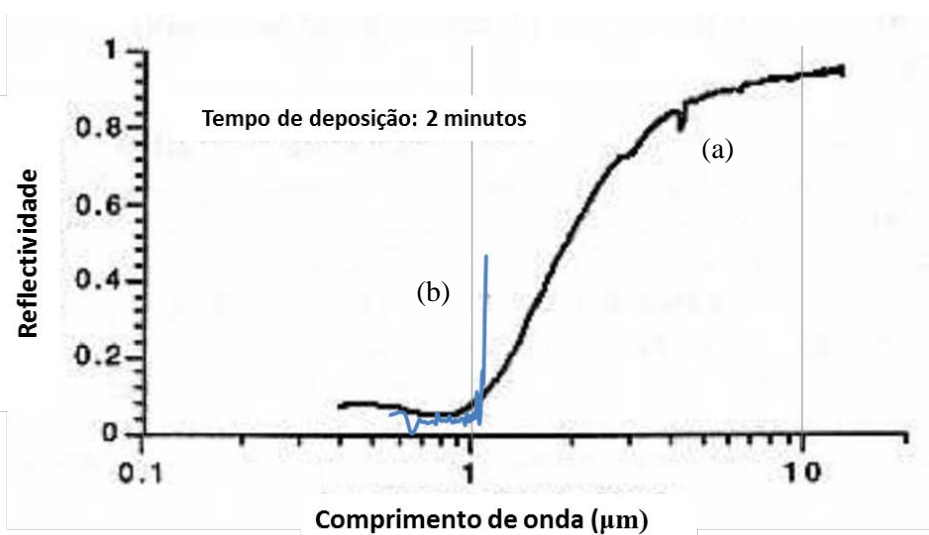


Fig. 3-22 – Comparação de curvas de reflectividade espectral; (a) curva adaptada de medidas feitas na Escola de Engenharia de Rapperswil, Suíça. (Santelices, 1991); (b) curva obtida com  $i=144$  mA e tempo de deposição de 2 minutos.

Da análise do gráfico acima é possível perceber que as limitações no sistema de medida de reflectividade não permitem tirar resultados conclusivos sobre as superfícies selectivas criadas no âmbito desta tese. Ainda assim permite constatar que, ainda que numa gama baixa de comprimentos de onda, as superfícies criadas possuem bons comportamentos selectivos, dado que a tendência da curva de reflectividade para a superfície obtida seria a de passar para valores perto de 1 a partir de comprimentos de onda muito altos, tal como acontece com a curva (a). Observa-se ainda, que a curva (b) tem uma tendência de subida para valores altos de reflectividade mais rápida do que a curva (a), o que poderá indicar melhores comportamentos selectivos e consequentemente melhores performances quando integrada num sistema solar térmico.

## 4. Conclusões e Trabalho Futuro

Na conjuntura actual de crise financeira em que as necessidades energéticas aumentam tal como os preços dos combustíveis convencionais é importante enveredar por um caminho que dê importância às energias renováveis e que as torne acessíveis a todos. Neste contexto é relevante a possibilidade de fabricar sistemas de fornecimento de energia com recurso a fontes de energia renováveis a baixos custos de modo a poder disseminar o uso deste tipo de tecnologias a toda a população, em particular no caso da água quente solar, numa lógica de auto-construção. Na sequência de um trabalho anterior (Glória, J.P. 2011) pretendeu-se dar um contributo nesse sentido, testando a possibilidade de construir por processos simples melhores superfícies absorvedoras para colectores solares térmicos.

As melhores superfícies absorvedoras para um colector solar térmico são as que apresentam comportamentos selectivos, uma vez que permitem conciliar baixas perdas radiativas na região térmica do espectro, com elevadas absorções na região do espectro solar, permitindo assim obter temperaturas de trabalho mais elevadas. Neste trabalho foi testada a possibilidade de, com meios facilmente acessíveis, produzir superfícies selectivas de *black nickel* sobre chapas de cobre. Foi utilizada a técnica da electrodeposição, fazendo variar o tempo de deposição e as correntes aplicadas por forma a se poder perceber qual a importância de cada um destes factores no desempenho final dos revestimentos produzidos.

As superfícies obtidas no âmbito deste trabalho foram caracterizadas para se determinar a sua capacidade selectiva. Com esse objectivo foi desenvolvido um sistema de medição de emissividades que permite medir a emissividade de qualquer superfície. Este sistema foi utilizado para medir as emissividades das superfícies produzidas, concluindo-se que a qualidade do depósito não depende apenas da quantidade de massa depositada mas também da taxa de deposição à qual é executada a electrodeposição. As superfícies produzidas foram igualmente caracterizadas através da medição da sua reflectividade espectral, utilizando uma montagem experimental existente no Laboratório de Aplicações Fotovoltaicas e Semicondutores, o que permitiu obter também a sua absorptividade espectral. A partir destes dois conjuntos de resultados, foram quantificadas as propriedades selectivas das diferentes superfícies, obtendo a sua selectividade.

Seguidamente será feita uma estimativa do desempenho que se poderá esperar das superfícies obtidas, comparando as curvas de rendimento esperadas para um colector que as utilize, relativamente a outras soluções (absorvedor não-selectivo, e tintas existentes no mercado). A modelação da eficiência dos colectores foi feita utilizando a equação (9) (Campaniço, 2010)

$$\eta = \frac{Q_{\text{útil}}}{Q_{\text{total}}} = \frac{\alpha \times G \times A - \varepsilon \times \sigma \times A \times (T_{\text{absorvedor}}^4 - T_{\text{ambiente}}^4) - h \times A \times (T_{\text{absorvedor}} - T_{\text{ambiente}})}{G \times A_{\text{colector}}} \quad (9)$$

onde ( $\alpha$ ) representa a absorptividade do absorvedor,  $G=1000 \text{ W/m}^2$  os ganhos solares do colector por unidade de área,  $A$  a área do absorvedor,  $A_{\text{colector}}$  a área do painel,  $\varepsilon$  a emissividade térmica do absorvedor,



$\sigma=5,67 \times 10^{-8} \text{ W.K}^{-4}\text{m}^{-2}$  a constante de Stefan-Boltzmann, e o coeficiente global de perdas cujo valor típico contabiliza já as perdas condutivas e convectivas do painel. Em todas as curvas admitir-se-á uma temperatura ambiente de 20°C, e todas as temperaturas são expressas em Kelvin.

Para um colector não selectivo os valores de absorvidade e emissividade serão iguais (0,95), dado que este tipo de superfícies absorve e emite sempre da mesma maneira. Para o absorsor selectivo serão utilizados os valores obtidos para as superfícies em estudo neste trabalho, sendo que será escolhida uma placa de cada série de resultados.

Tratando-se de um colector plano a área do absorsor e do colector serão consideradas como sendo iguais, neste caso  $1 \text{ m}^2$ . As temperaturas utilizadas para este estudo situar-se-ão entre os 20°C e os 120°C. As superfícies escolhidas para esta comparação foram as superfícies com tempos de deposição de 2 e 3,5 minutos da Tabela 3-6, as de 1,5 e 2 minutos de deposição da Tabela 3-7 e a de 2 minutos da Tabela 3-8.

Com estas relações obtiveram-se as seguintes curvas (Fig. 4-1):

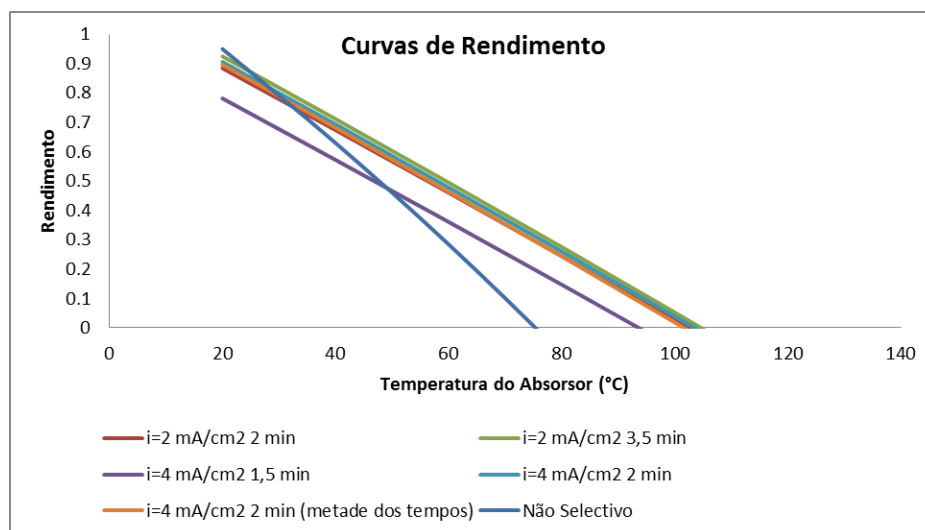


Fig. 4-1 – Curvas de rendimento de um absorsor não selectivos e de alguns absorsores selectivos

Neste gráfico é possível estabelecer a comparação das curvas de rendimento de um colector solar com um absorsor não selectivo e de alguns absorsores selectivos criados no âmbito deste trabalho. A análise destas curvas mostra que, mesmo para a pior superfície selectiva produzida são de esperar ganhos da ordem dos 20°C da temperatura de estagnação<sup>14</sup> dos colectores. Para as restantes superfícies estes ganhos serão da ordem dos 30°C.

Optou-se também por comparar as superfícies obtidas nesta tese com um método para criação de absorsores selectivos que passam por pintar as superfícies com uma tinta com propriedades selectivas existente no mercado. Esta tinta é produzida pela empresa SOLEC, empresa norte americana

<sup>14</sup>Temperatura máxima que pode ser atingida pelo absorsor em que as perdas para a atmosfera são iguais ao calor transferido para o fluido de circulação.

“fabricante de camadas ópticas reflectoras e absorptoras especializadas para as indústrias solar e construção” (SOLEC, 2011). A tinta é designada por *SOLKOTE HI/SORB-II Selective Solar Coating* e no site da empresa são mostradas as características da tinta selectiva nomeadamente os valores de absorptividade e emissividade. Estes valores foram obtidos fazendo variar as camadas de tinta que eram sobrepostas sobre uma chapa de cobre ou de alumínio.

Tabela 4-1 – Tabela de valores de absorptividade e emissividade para a tinta selectiva da empresa SOLEC (SOLEC, 2011)

	2 camadas	3 camadas	4 camadas	5 camadas	6 camadas
<b>Emissividade</b>	0,23	0,24	0,23	0,25	0,27
<b>Absorptividade</b>	0,87	0,90	0,91	0,92	0,92
<b>Selectividade</b>	3,74	3,74	4,06	3,63	3,39

Utilizando os valores da Tabela 4-1 serão calculados valores de rendimento para absorptores que utilizem estas tintas para obterem a sua selectividade utilizando novamente a relação (9).. Posteriormente o comportamento destas tintas selectivas será comparado com a superfície que apresenta melhores valores de rendimento verificados na Fig. 4-1 e que será a placa correspondente a 3,5 minutos de deposição com uma densidade de corrente de  $2 \text{ mA/cm}^2$ , mesmo não sendo esta placa a que apresenta melhores valores de selectividade, no entanto o facto de ter os melhores valores de rendimento poderá dever-se ao facto de ser esta a superfície obtida por electrodeposição a que possui melhores valores de absorptividade espectral.

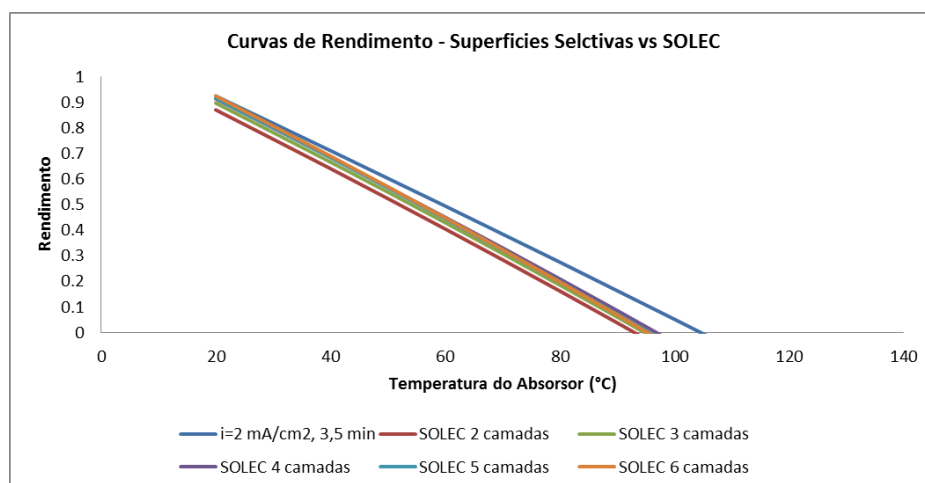


Fig. 4-2 – Curvas de rendimento dos absorptores selectivos e da tinta da SOLEC

Pela análise do gráfico representado na figura acima verifica-se que a superfície obtida por electrodeposição apresenta um melhor comportamento selectivo quando comparada com a tinta selectiva da SOLEC e a sua utilização em várias configurações de camadas na tentativa de melhorar a selectividade do absorptor solar.

Estas comparações permitem concluir que os resultados obtidos neste trabalho foram globalmente satisfatórios. Porém, existe algum trabalho por fazer e que daria uma boa continuidade ao que foi feito nesta tese. Concretamente, deverão ser feitos mais estudos de modo a poder melhorar a homogeneidade das superfícies e por conseguinte o seu comportamento; medir as suas reflectividades na totalidade da superfície das amostras e não apenas num ponto; seria bom caracterizar as superfícies com estudos de envelhecimento de modo estimar o seu tempo de vida útil; tentar reproduzir o que foi feito nesta tese a uma escala maior e integrar um absorsor selectivo dos que aqui são propostos num sistema solar térmico auto-construído o que permitiria avaliar o seu desempenho real no aquecimento de águas quentes sanitárias.

## 5. Bibliografia

- Painel Solar Térmico. (2009). Obtido em Janeiro de 2012, de Sistemas Solares Térmicos:  
<http://www.painelsolartermico.com/sistemas-solares-termicos/>
- Página da Associação Austríaca de Poupança de Energia. (2010). Obtido em 17 de Maio de 2011, de O.O. Energiesparverband: <http://www.esv.or.at/english/energy-in-upper-austria/solar-energy/>
- Água Quente Solar. (2011). Obtido em 18 de Maio de 2011, de <http://www.aguaquentesolar.com/>
- Portal das Energias Renováveis. (2011). Obtido em 17 de Maio de 2011, de [http://www.energiasrenovaveis.com/DetalheConceitos.asp?ID\\_conteudo=47&ID\\_area=8&ID\\_sub\\_area=27](http://www.energiasrenovaveis.com/DetalheConceitos.asp?ID_conteudo=47&ID_area=8&ID_sub_area=27)
- Sapa Solar. (2011). Obtido em 17 de Maio de 2011, de Sapa Solar: <http://www.sapa-solar.com/sun-hours-european-city.html>
- WorldOils. (2012). Obtido em 3 de Janeiro de 2012, de The World's Oil and Gas Central: <http://www.worldoils.com/oilprice.php>
- Bogaerts, W. F., & Lampert, C. M. (15 de Fevereiro de 1983). Materials for photothermal solar energy conversion. *Journal of Materials Science*, pp. 2847-2875.
- Campaniço, H. (2010). Sistemas Solares Térmicos Centralizados: Aplicação em Habitação Social. FCUL.
- Carvalho, M. J. (1 de Novembro de 2009). Energia Solar Térmica - Captação e Conversão de Energia I. *Introdução aos Colectores Solares Térmicos e Balanços Térmicos*.
- Chopra, K. L., & Reddy, G. B. (Agosto de 1986). Optically Selective Coatings. *Journal of Physics*, pp. 193-217.
- Cowan, B. (2007). Lambertian Surfaces. *Introduction to Computer Graphics - Lecture Notes*. Kitchener, Ontario, Canada: University of Waterloo.
- de Almeida, P., & D. Silva, P. (2009). The Peak of Oil Production - Timings and Market Recognition. *Energy Policy*, 1267-1276.
- EurObserv'ER. (2011). *Solar Thermal and Concentrated Solar Power Barometer*. EurObserv'ER.
- Glória, J. P. (2011). *Autoconstrução solar térmica em Portugal: avaliação técnico-económica para a cantina universitária da Universidade de Lisboa*. Lisboa: FCUL.
- GreenPro. (2004). *Energia Solar Térmica - Manual sobre Tecnologias, Projecto e Instalação*. União Europeia.
- Henninger, J. H. (Abril de 1984). *Solar Absorptance and Thermal Emittance of Some Common Spacecraft Thermal-Control Coatings*. Greenbelt, Maryland, USA: NASA.

- Kalogirou, S. A. (2004). Solar thermal collectors and applications. *Progression in Energy and Combustion Science*, 231-295.
- Kivaisi, R. T., & Stensland, L. (1982). Spectral Selectivity of Nickel and Chromium Rough Surfaces. *Applied Physics A*, 233-238.
- Konttinen, P. (24 de Outubro de 2000). ACCELERATED AGING AND OPTICAL CHARACTERIZATION OF ABSORBER SURFACES FOR SOLAR COLLECTORS. Espoo, Helsinquia, Finlândia: Universidade Tecnológica de Helsinquia.
- Lanz, R. (2005). *Do-it-yourself solar water heating in Hungary: Prospects and barriers and comparison with the Austrian experience*. Budapeste.
- Loureiro, D. (2009). *Desenvolvimento da Energia Solar em Portugal*. Lisboa: INETI.
- Pereira, M. C., & Carvalho, M. J. (2005). *Solar Térmico Activo*.
- Santelices, D. C. (Maio de 1991). Surfaces selectives pour l'absortion solaire: fabrication, mesures d'emissivite, et applications dans les systemes solaires dans le cas de la Bolivie. Université de Genève.
- Schlesinger, M. (Setembro de 2002). *Electrochemistry Encyclopedia*. Obtido de Case Western Reserve University: <http://electrochem.cwru.edu/encycl/art-e01-electroplat.htm>
- Sebasol. (2011). Obtido de Sebasol - Centre Regionaux: <http://www.sebasol.ch/presentation.asp?rubrique=0>
- Sengupta, S. K., Farnham, J. M., & Whitten, J. E. (2005). A Simple Low-Cost Lock-In Amplifier for the Laboratory. *Journal of Chemical Education*, 1399-1401.
- Sociedade do Sol. (2009). *Manual de Manufatura e Instalação Experimental do ASBC - Aquecedor Solar de Baixo Custo*.
- SOLEC. (2011). *SOLEC - Solar Energy Corporation*. Obtido em 16 de Janeiro de 2012, de <http://www.solec.org/index.html>
- Spitz, J., Aubert, A., Behaghel, J. M., Berthier, S., & Rivory, J. e. (14 de Janeiro de 1979). Matériaux sélectifs pour la conversion photothermique de l'énergie solaire. *Revue de Physique Appliquée*, pp. 67-80.
- Sw. (s.d.).
- Wäckelgard, E. (1998). Characterization of black nickel solar absorbing coatings electroplated in a nickel chlorine aqueous solution. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 35-44.
- Weiss, W., & Mauthner, F. (2011). *Solar Heat Worlwide - Markets and Contribution to the Energy Supply 2009*. Gleisdorf, Áustria: IEA Solar Heating and Cooling Programme.

